

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

Кафедра приладів і систем орієнтації і навігації

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ

«__» _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно - інтегровані технології та системи
навігації і керування»**

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

на тему: «Автоматизована система обробки акустичних сигналів»

Виконав (-ла):

студент (-ка) III курсу, групи ПГ-п71

Дзісенко Антон Андрійович

Керівник:

Доцент к.т.н.

Мураховський Сергій Анатолійович

Рецензент:

Доцент к.т.н.

Маркін Максим Олександрович

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає запозичень з
праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Анотація

Даний дипломний проект являє собою проектування та програмування автоматизованої системи обробки акустичних сигналів, виконаної з використанням не типового чутливого елемента. В ролі чутливого елемента виступає мікромеханічний акселерометр GY-291. Основою для підключення чутливого елемента та знаття з нього сигналу являє собою плата-контроллер Arduino UNO R3 на базі мікроконтроллера Atmega328. Програма для підключення датчика та знаття з нього сигналу виконувалась в середовищі Arduino IDE мовою C++. Обробка, знятого сигналу проводилась в середовищі MATLAB.

В першому розділі розглянуто існуючі системи для зняття аудіо сигналу. Розглянуто їх принципи роботи та основні переваги і недоліки.

Другий розділ містить інформацію про параметри акустичних сигналів, їх характеристику та завади, що виникають під час зняття та обробки сигналу. Також в другому розділі розглянуто фільтри для роботи з аудіо сигналами та їх різновиди.

Третій розділ описує побудований макет та програми для знаття та обробки сигналу. В ньому розглянуто недоліки та переваги даної системи обробки аудіо сигналів та описаний алгоритм роботи.

Abstract

This diploma project is the design and programming of an automated acoustic signal processing system using an atypical sensitive element. The sensitive element is a GY-291 micromechanical accelerometer. The Arduino UNO R3 controller board based on the Atmega328 microcontroller is the basis for connecting the sensitive element and removing the signal from it. The program for connection and removal of the sensor signal was performed in the Arduino IDE environment in C++ language. Processing of the removed signal was performed in the MATLAB environment.

The first chapter describes existing systems for audio removal. Their operating principles and main advantages and disadvantages are considered.

The second section contains information about the parameters of acoustic signals, their characteristics and interference that occurs during signal removal and processing. The second section also discusses filters for working with audio signals and their types.

The third section describes the layout and programs for signal acquisition and processing. It deals with the disadvantages and advantages of this audio processing system and describes the algorithm of work.

ВСТУП

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ

- 1.1 Кнопка «розмова»
- 1.2 Ларингофон
- 1.3 Мікрофон з датчиком руху обличчя користувача
- 1.4 Мікрофон що формує сигнал з вібрації черепа
- 1.5 Навушники з кістковою провідністю звуку
- 1.6 Динамічні мікрофони
- 1.7 Конденсаторні мікрофони
- 1.8 Вугільні мікрофони

РОЗДІЛ 2 ОПИС АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ ТА ПРИЛАДІВ ДЛЯ ЇХ ПЕРЕТВОРЕННЯ

- 2.1 Опис акустичних сигналів
 - 2.1.1 Динамічний діапазон
 - 2.1.2 Середній діапазон
 - 2.1.3 Частотний діапазон
 - 2.1.4 Первинний розмовний сигнал
 - 2.1.5 Вторинний сигнал
 - 2.1.6 Шуми та завади
 - 2.1.7 Лінійні викривлення
 - 2.1.8 Не лінійні викривлення
 - 2.1.9 Перехідні викривлення
 - 2.1.10 Критерії оцінки звучання
- 2.2 Опис приладів для перетворення та обробки акустичних сигналів
 - 2.2.1 Призначення та класифікація фільтрів
 - 2.2.2 Базові цифрові фільтри
 - 2.2.3 Фільтри низьких та високих частот 1го порядку
 - 2.2.4 Фільтри низьких та високих частот 2го порядку

2.2.5 Все пропускні фільтри 1 та 2 порядків

2.2.6 Параметричні фільтри

2.2.7 Кросовери

РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРОБКА МАКЕТУ

3.1 Опис приладів, що використовувалися в роботі

3.2 Опис пристрою для запису сигналу

3.3 Опис алгоритму обробки

ВИСНОВОК

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ВСТУП

З поширенням оточуючого нас шуму, все частіше поширюється проблема нечіткої передачі голосового сигналу стандартними методами. Звичайний мікрофон в сучасному місті не завжди справляється з вимогою прибирати «шум» в сигналі. Через це звуковий сигнал, що генерується людиною, яка представляє нашу зацікавленість, може бути порушений оточуючим його шумом.

Система детектування голосу призначена для введення аудіо інформації. Вона складається з мікрофона, що поєднаний з датчиком голосу. Другий формує сигнал, оснований на незвуковому сигналі. Він створюється на основі дій, що виконую людина яка говорить, таких як рух обличчя, вібрація кісток, вібрація горла, зміна повного опору горла і т.д. Компоненти детектора голосу генерують сигнал детектування голосу, що вказує на те, що користувач розмовляє та додатково знаходить комбінований сигнал шляхом множення сигналу детектування голосу на сигнал мікрофона, а процесор розпізнавання голосу розпізнає голос для забезпечення вихідного сигналу розпізнавання, що вказує на розмову в сигналі мікрофона на основі комбінованого сигналу.

Такий метод допомагає записувати та передавати звуковий сигнал людини, що нас цікавить лише при розмові. На разі існує декілька методів роботи системи детектування голосу. Вони часто використовуються в військовій галузі та сферах які пов'язані з великим рівнем шуму навколишнього середовища.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ТА МЕТОДІВ ОБРОБКИ

До самих поширених методів детектування голосу відносяться такі системи як кнопка «розмова» на мікрофоні, ларингофону, мікрофон з датчиком руху обличчя, мікрофон з датчиком що формує сигнал з вібрації черепа. Також подібна технологія використовується в навушниках, що передають звуковий сигнал з допомогою кісткової провідності.

1.1 Кнопка «розмова»

Один з самих поширених варіантів реалізації такої системи в побуті – встановлення кнопки «вмикання/вимикання» мікрофона на проводі гарнітури, а також з допомогою програмного забезпечення, в випадках знаходження кнопки в інтерфейсі програми. Він називається натискною кнопкою «розмова». Користувач повинен натиснути кнопку перед початком розмови. Під час цього створюється сигнал що вказує системі на те, що особа, яка представляє інтерес в даний момент розмовляє або почне розмовляти. Але ця система не задовольняє потреби користувачів, тому що під час розмови особи, що нас цікавить мікрофон також записує звук навколишнього середовища. Такий аудіо сигнал виходить з досить високим рівнем шуму для кінцевого користувача, рисунок 1.1 [1].



Рисунок 1.1 – Кнопка «Розмова» на навушниках

На сучасній гарнітурі кнопка «розмова» отримала набагато більший функціонал та майже втратила своє початкове призначення. Також ця кнопка перейшла на більшість програм для відео та голосових дзвінків через інтернет. В цих програмах вона має своє попереднє значення, та вмикає або вимикає мікрофон під час та після завершення розмови людини.

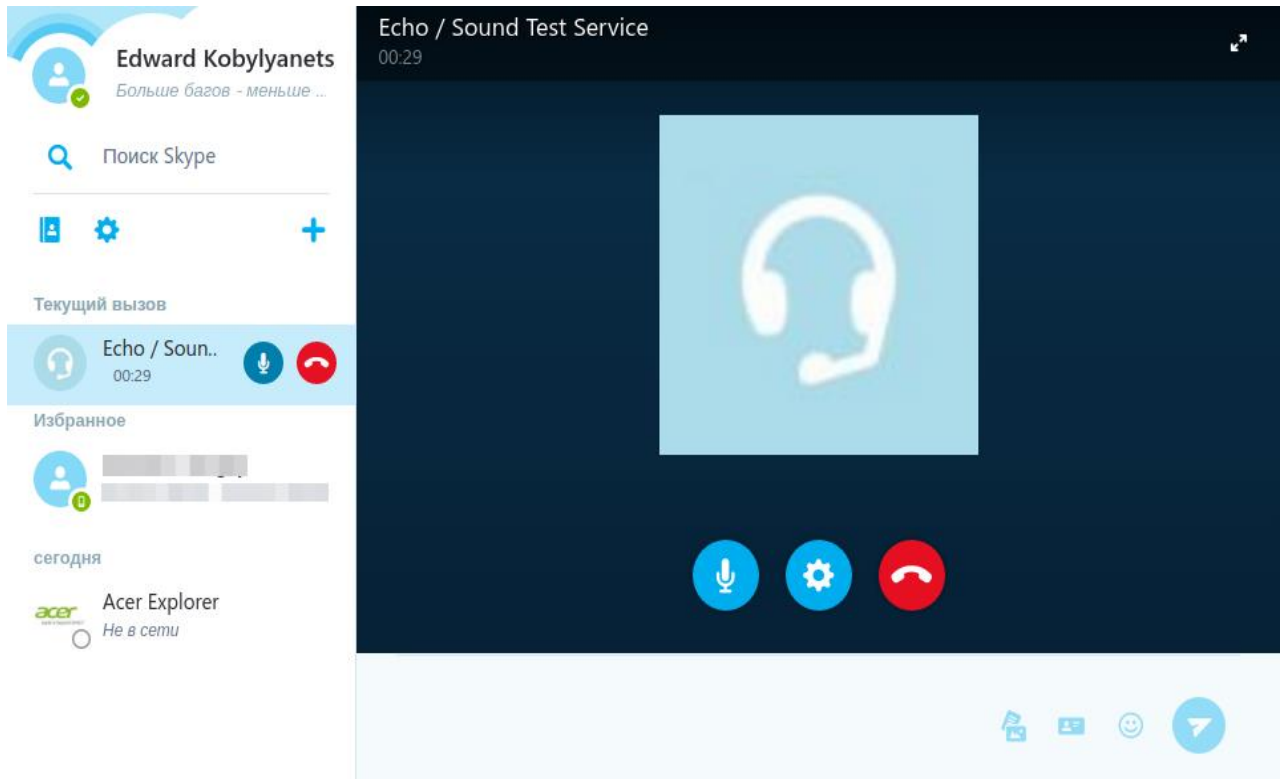


Рисунок 1.2 – Кнопка «Розмова» в програмі для відео та аудіо дзвінків

1.2 Ларингофон

Ларингофон – різновид мікрофона, що використовує механічні коливання шкіри біля гортані, які виникають при розмові, для подальшого перетворення в електричний аудіо сигнал.

Використовується в складі гарнітури для передачі розмови в умовах підвищеного зовнішнього акустичного шуму(танкові та авіаційні шоломи, різного роду скафандри , противогази та распіратори). В поєднанні з навушниками називається – «шлемофон» .

Коливання шкіри горла людини передаються на перетворювач коливань в електричний сигнал. Сам перетворювач може бути використаний на елементах з різним принципом дії. Наприклад вугільний мікрофон чи мікрофон на п'єзоелектричних датчиках, або електродинамічні перетворювачі.

На теперішній момент вони представляють складну будову, що складається з мікрофона, гнучкого пуста в середині звукопроводу, що схожий на медичний стетоскоп та перетворювач, що сприймає звук з пристроєм для кріплення на шиї. Під час використання повинен бути міцно прикріплений до шиї.

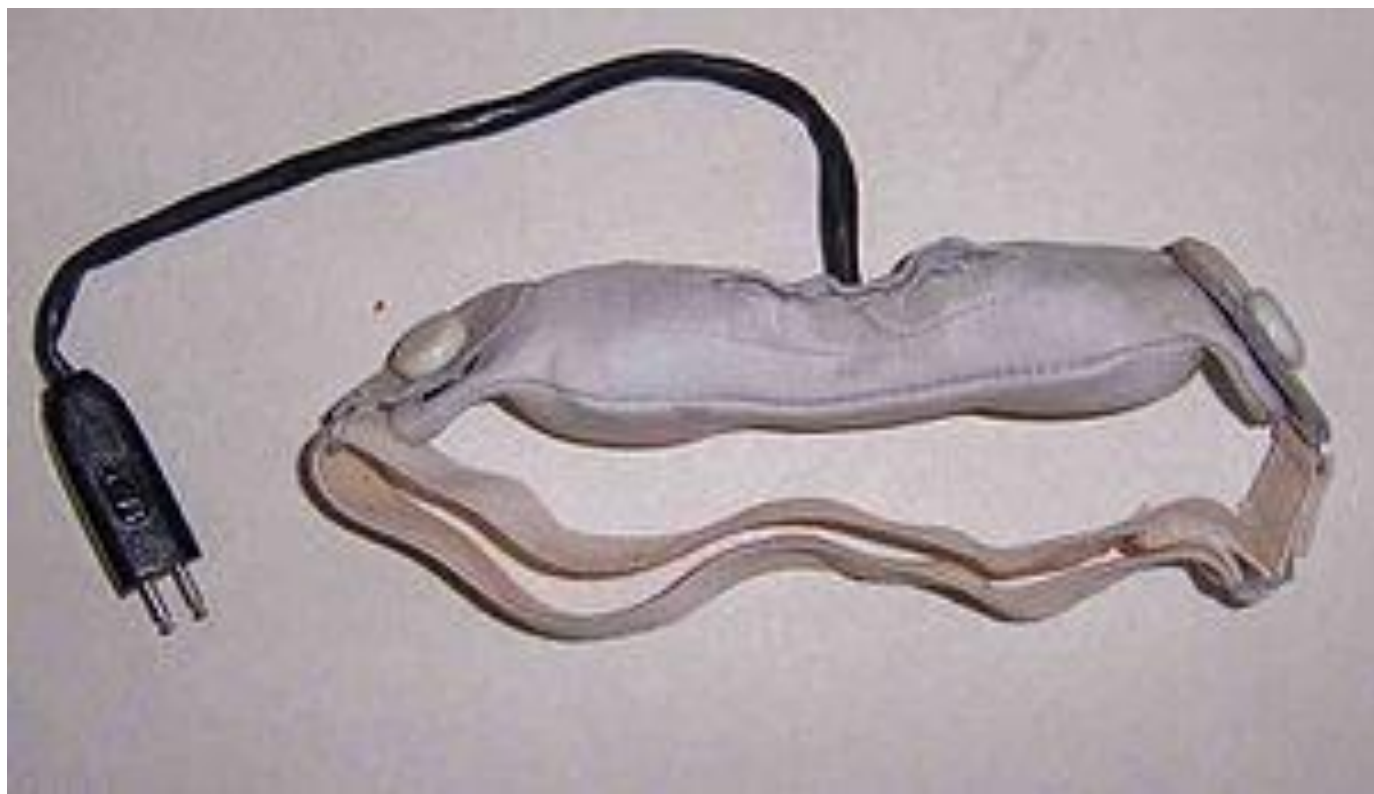


Рисунок 1.3 – Загальний вигляд ларингофона

Одні з перших моделей ларингофонів будувались на основі вугільних мікрофонів(іноді на основі мікрофонів інших типів) та мали невеликі розміри. Розміщувалися парами в шкіряному чохлі з еластичними ремінцями для кріплення.

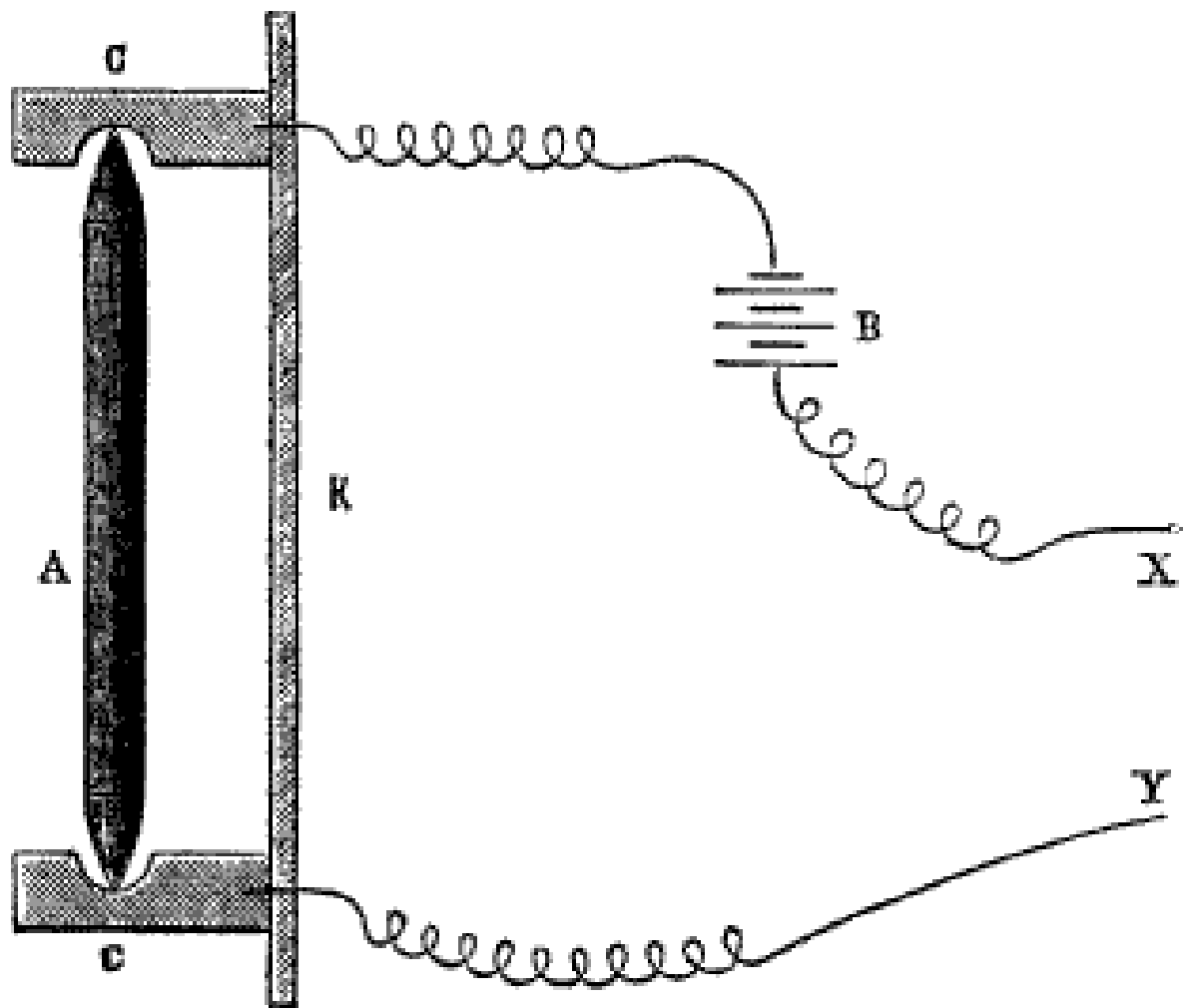


Рисунок 1.4 – Чутливий елемент вугільного мікрофону Юза

Вугільні мікрофони це одні з перших видів мікрофонів. Вони склалися з металевих пластин, що були герметично закриті в спеціальну капсулу. Між пластинами знаходився вугільний порошок. Стінки капсули, іноді одна з них, кріпилися до чутливого елемента – мембрани. Під час розмови, змінювався тиск на пластини, вони в свою чергу стискали вугільний порошок, через що змінювалась площа контакту між окремими частинками порошка. В результаті змінювався опір між пластинами. По пластинах пропускався електричний струм та внаслідок зміни опору, напруга між пластинами також змінювалася. Його основною відмінністю від мікрофонів інших типів являється те що він використовується не в ролі перетворювача а в ролі підсилювача, тому що енергія

корисного електричного сигналу створюється зовнішнім джерелом постійного напруги, а акустичні коливання лише керуються потоком енергії, змінюючи опір електричного кола.

Ларингофони призначені для сприймання голосу через коливання тканин шиї, розташованих біля гортані. Під час роботи сприймаються не акустичні хвилі, а механічні коливання стінок голосового тракту, спричинені акустичними коливаннями при вимові звуків.

Вони основані на інерційному принципі дії. Капсуль ларингофона знаходиться в закритому корпусі, що розташований на передній стороні стінки гортані. Часто використовують два послідовно ввімкнених капсулів ларингофона, що розташовуються по обидві сторони гортані, рисунок 1.5.

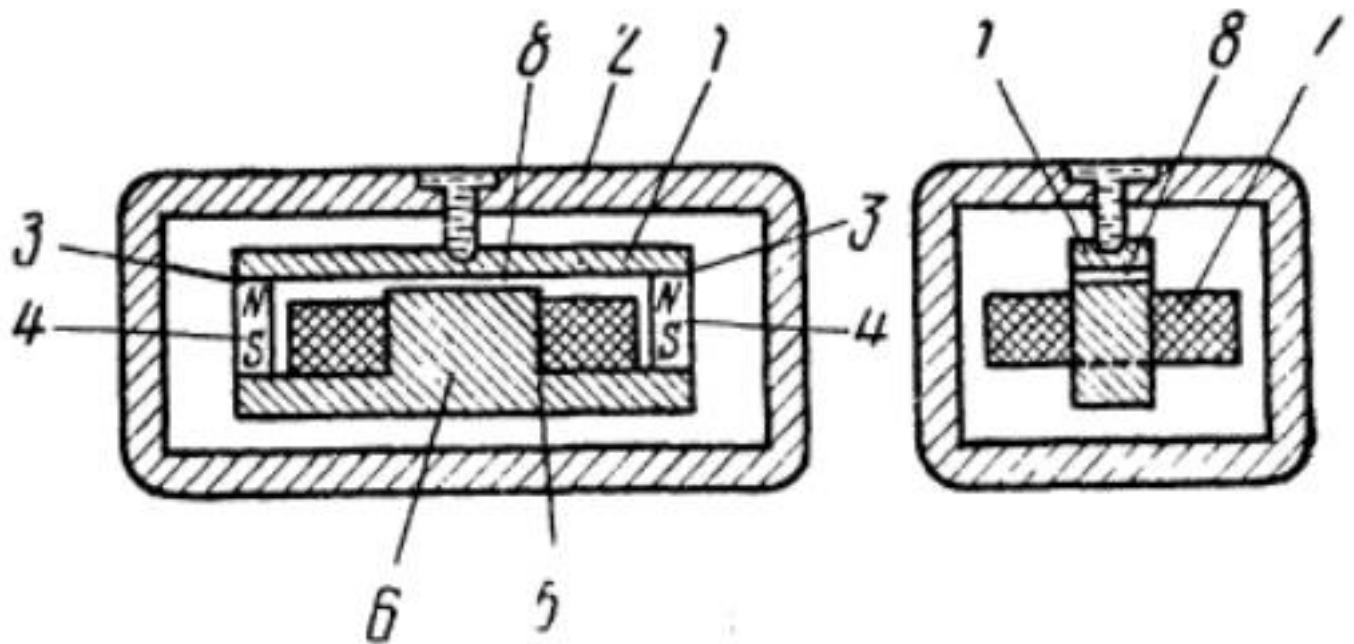


Рисунок 1.5 – Електромагнітний ларингофон

1 – діафрагма; 2 – корпус; 3 – місце кріплення планки з магнітом; 4 – магніти;
5 – фланець; 6 – керн; 7 – котушка; 8 – повітряний зазор

Електромагнітний ларингофон замість діафрагми має плоску, прямокутну пластину 1, що закріплена на середній точці корпусу 2 та прикріплену до магнітної системи 3 з обох сторін. Магнітна система складається з двох плоских

магнітів 4, фланця 5, керна 6 та пластини 1. Між зрізом керна та пластини розташований невеликий зазор 8. На керні знаходиться котушка 7. Механічна система представляє собою масу з гнучкістю. Механічні коливання стінок гортані призводять до руху корпусу ларингофона. Під дією інерції маса коливається в протилежній фазі, зазор змінюється в такт механічних коливань гортані. Зміна зазору спричиняє зміну магнітного потоку. В результаті в котушці індукується ЕРС.

Якщо врахувати, що швидкість коливань стінок гортані при розмові зменшується обернено пропорційно квадрату частоти, то необхідно, щоб напруга збільшувалась, зі збільшенням частоти, по квадратичному закону. Цього досягають підбором резонансної частоти механічної системи більшої передаваного діапазону частот.

Такий ларингофон повинен добре передавати всі форманти звуків розмови. Але на практиці високочастотні звуки передаються погано, так як їх рівень в коливаннях гортані порівняний з рівнем шумів, що спричинені життєдіяльністю організму.

Ларингофони мають приблизно таку ж саму чутливість як електромагнітні мікрофони. Нерівномірність частотної характеристика не велика. Частотний діапазон 300-3000Гц. Вони володіють великою захищеністю від сторонніх шумів та можуть працювати в умовах шумів до 130 дБ [8].

1.3 Мікрофон з датчиком руху обличчя користувача

Під час роботи такої системи використовується спеціальна камера з датчиком руху, сигнал якої інформує систему про те, що користувач, тобто особа яка нас цікавить розпочала розмову. Після цього сигналу система розпочинає запис або передачу аудіо сигналу. З розвитком технологій замість спеціальної камери розпочали використовувати спеціальну програму, що з допомогою камери розпізнає частини тіла людини та спостерігає за його ротом. Іншими словами сигнал про початок розмови отримується програмно.

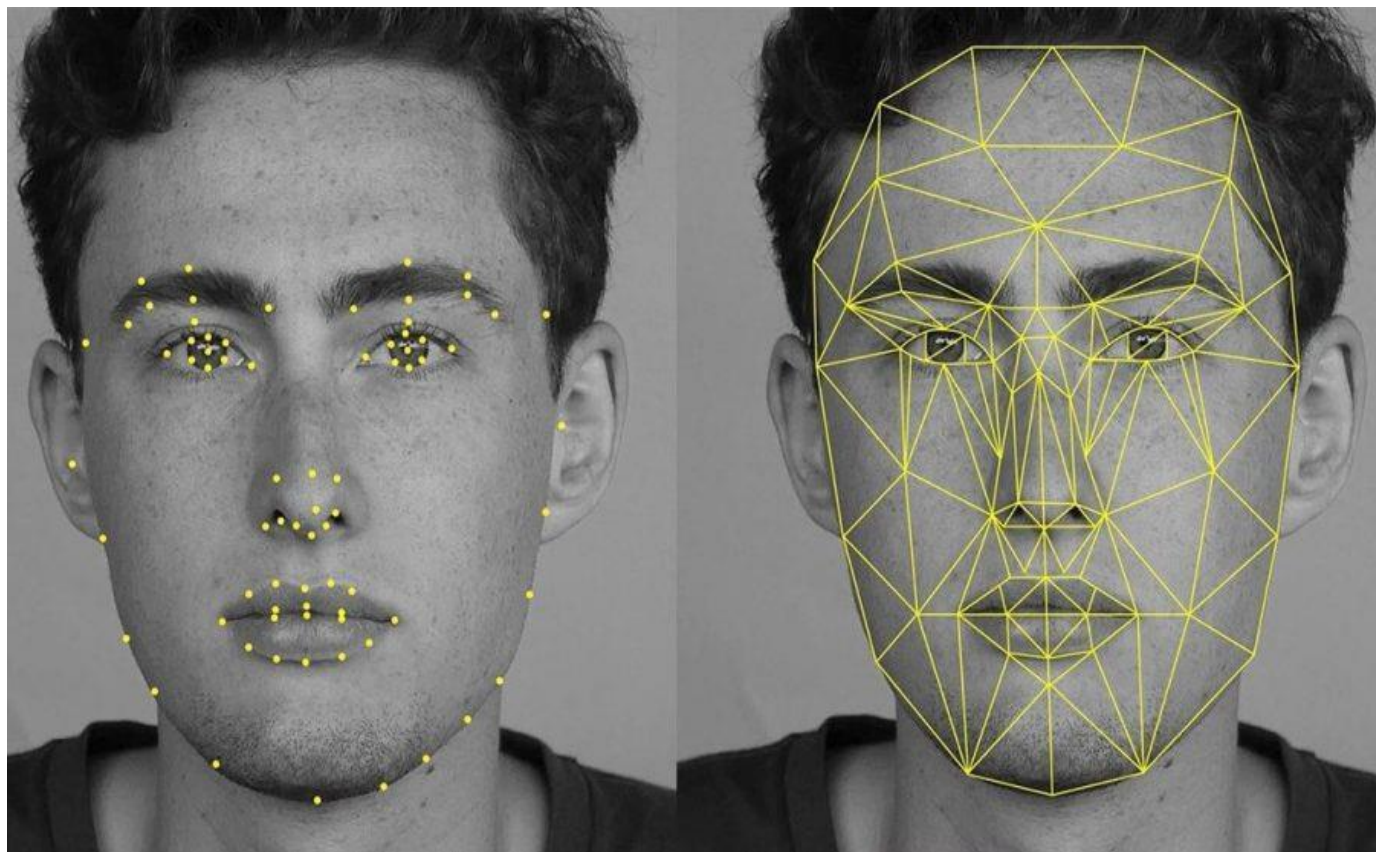


Рисунок 1.6 – Розпізнавання обличчя з допомогою програмного забезпечення

1.4 Мікрофон з датчиком що формує сигнал з вібрації черепа

Аксессуар виконаний як гарнітура для непомітного використання. В одному корпусі навушника розміщено вібраційний мікрофон та динамік. Передача виконується шляхом зняття сигналу з вібрації кісточки вуха. Достатньо чітко вимовляти слова зі звичайною громкістю. Кнопка передачі РТТ (англ. Push-to-talk) розміщена на окремому проводі. Вона використовується для зміни режиму «розмовляти»/«слухати». Такі пристрої використовуються в роботі портативних радіо станцій, в сильно шумних умовах зі збереженням хорошої чіткості вимови [4].



Рисунок 1.7 – Принципова схема гарнітури з вібраційним мікрофоном



Рисунок 1.8 – Зовнішній вигляд гарнітури з вібраційним мікрофоном

В даному пристрої використовується вібромотор для запису звукового сигналу. Його котушка реєструє коливання, що викликані вібрацією черепа через розмову людини. Звуковий сигнал знімається з котушки. Через зовнішні вібрації,

що викликані розмовою магніт рухається в середині котушки, змінюючи магнітне поле навколо. В котушці, під дією електрорушійної сили, виникає індукційний струм. Записай датчиком звук пропускають через фільтр, щоб підсилити високі частоти, рисунок 1.9.

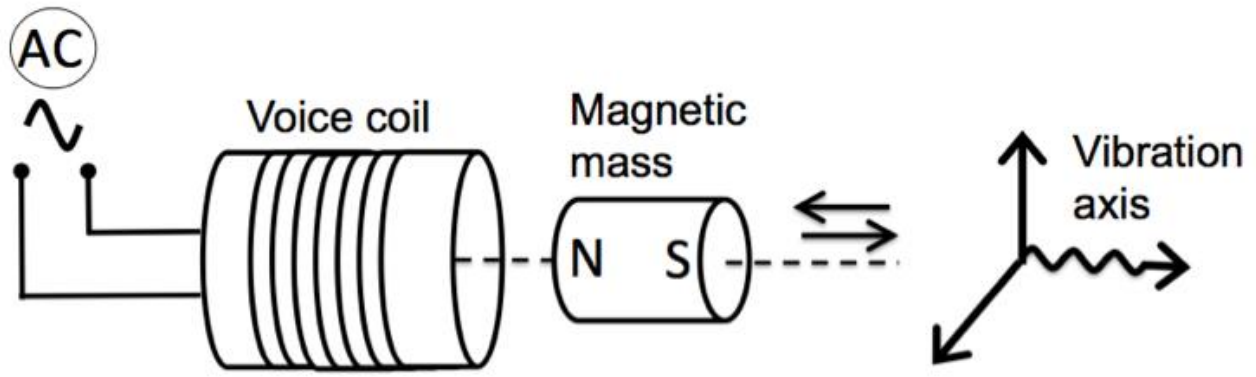


Рисунок 1.9 – Принципова схема роботи вібраційного мікрофона

1.5 Навушники з кістковою провідністю звуку

Один з поширених варіантів використання кістковою провідності звуку являються навушники «AfterShokz Trekz Titanium». При використанні кісткової провідності звуку, звукові хвилі декодуються та перетворюються в вібрації, що відправляються в обхід зовнішнього вуха до внутрішнього, створюючи коливання раковини. При використанні вони не перекривають вушну раковину, як звичайні навушники, а розташовуються біля кожного вуха, нижче скроні. Цим самим вони передають вібрації напряму до кістки, з якої «зчитує данні» внутрішнє вухо людини.

Навушники такого типу часто виступають в ролі вузькоспеціалізованої техніки. До них відносяться заняття спортом, постійні розмови, як альтернатива автомобільної гарнітури, в медицині при характерних захворюваннях та в армії і охоронній сферах.

До їх основної переваги належить те що вуха знаходяться відкритими і користувач чує що відбувається навколо нього [3].



а)

б)

Рисунок 1.10 – Зовнішній вигляд вібраційних навушників(а), принципова схема роботи(б)

1.6 Динамічні мікрофони

На рисунку 1.11 зображена схематична конструкція динамічного мікрофону. Принцип дії оснований на тому, що котушка 5 з намотаним на неї проводом, знаходиться в радіальному магнітному полі та коливається під дією на звукового тиску, пересікаючи силові лінії. В наслідок цього в ній індукується ЕРС.

Для створення магнітного використовують кільцевий магніт 1 з високоефіцієнтних сплавів та магнітопровід з м'яких матеріалів. Між керном та верхнім фланцем утворюється кільцевий зазор 4, в якому розміщують звукову котушку 5. Вона жорстко зв'язана з діафрагмою 9, яка має куполообразну форму для придання більшої жорсткості. Діафрагма з допомогою гофрованою гнучкого підвісу 7 закріплена на верхньому фланці та може коливатися тільки по вісі. Її виготовляють з легких, але міцних матеріалів. Корпус 13, з переду затягнутий захисною сіткою 8 для запобігання пошкодження діафрагми.

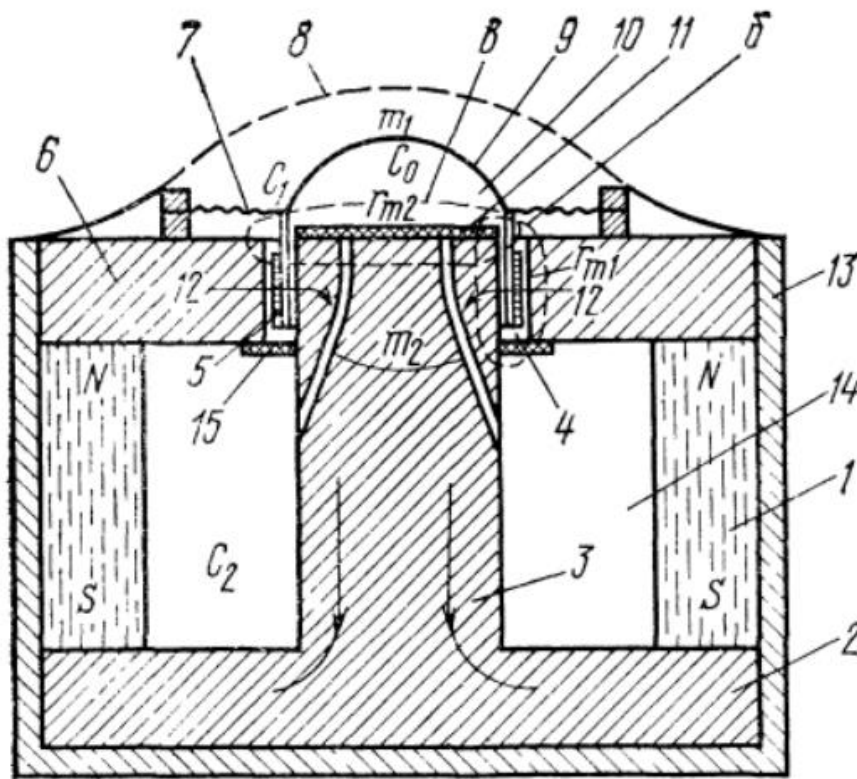


Рисунок 1.11 – Конструкція динамічного мікрофону-приймача

1- кільцевий магніт; 2- нижній фланець; 3- керн; 4-кільцевий зазор; 5- звукова котушка; 6- верхній фланець; 7-підвіс; 8-захисна сітка; 9- діафрагма; 10-простір під діафрагмою; 11- шовк; 12- канали; 13 – корпус; 14 – внутрішній об'єм; 15 – шайба з немагнітного матеріалу

Електрична характеристика такого мікрофону майже рівномірна на всьому діапазоні, тому що електричний опір котушки R_i майже не залежить від частоти(при високих частотах відбувається не велике збільшення опору)

$$\frac{U}{\varepsilon} = R_n / (R_n + R_i)$$

Коефіцієнт електромеханічного зв'язку $K_{св} = Bl$ – величина постійна. Він має майже рівномірну акустичну чутливість. При високих частотах, на яких довжина хвилі дорівнює розмірам мікрофону він має невелике підвищення. Для більшості мікрофонів, це спостерігається на частотах близьких 10 кГц [8].

1.7 Конденсаторні мікрофони

Конструкція конденсаторного мікрофону представляє собою конденсатор, один електрод якого масивний 3, а інших виконаний в вигляді тонкої мембрани 1. На конденсатор подається поляризуюча напруга U_0 через вимокоомний опір R_H . Джерело поляризуючої напруги не витрачає енергію, тому що постійна складова струму відсутня. При коливанні мембрани ємність конденсатора C_0 змінюється. Заряд конденсатора q не змінюється, він не встигає перезарядитися через велику постійну часу $R_H C_0 = \tau$. під час роботи змінюється напруга на ньому. Ця додаткова напруга $\Delta U = \varepsilon$ та буде означати ЕРС від дії звукового тиску на мембрану. Напруга, котру отримуємо на навантаженні, менша ЕРС через падіння напруги на ємності конденсатора.

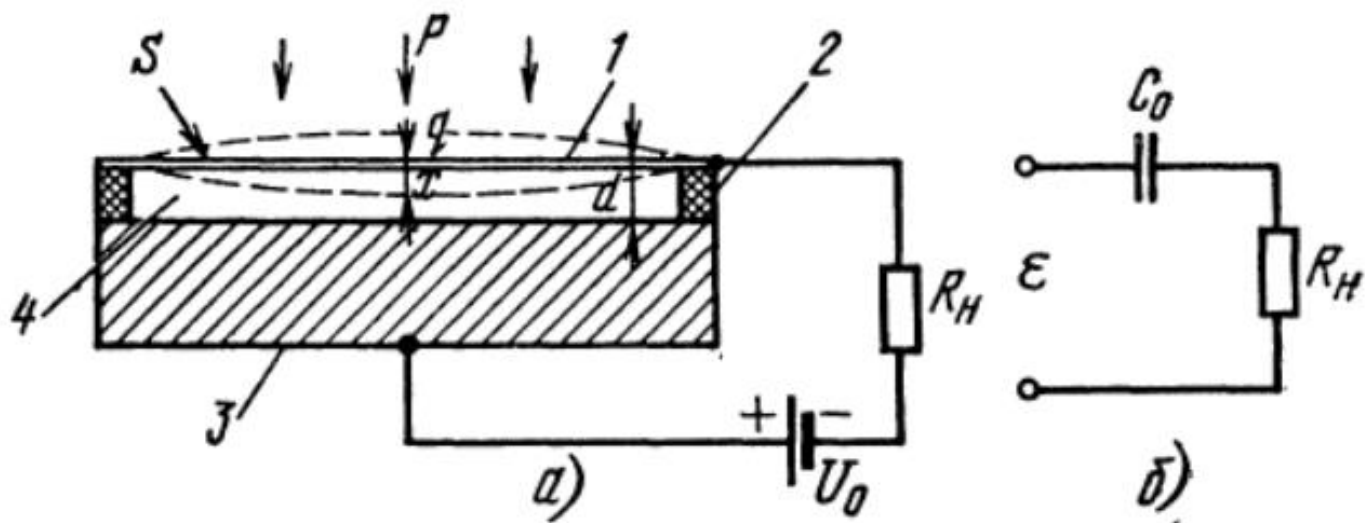


Рисунок 1.12 – Конденсаторний мікрофон

а) принципова схема б) електрична схема

1 – мембрана; 2 – ізоляційна прокладка; 3 – масивний електрод; 4 – зазор між електродами

Для конденсаторних мікрофонів акустична чутливість майже не залежить від частоти, тому що $\frac{F}{p} = (1/2)S$, де S – ефективна поверхня мембрани.

Для невеликої нерівномірності електричної потрібно виконати умову

$R_H \geq 1/\omega_H C_0$, де ω_H – нижня межа частотного діапазону. Якщо рахувати, що ємність конденсатора $C_0 = 100 \dots 200$ пФ то нижня межа $f_H = 30$ Гц, а опір навантаження $R_H \geq 50$ МОм. Оскільки вхідний опір підсилювача повинен бути в 10 – 20 разів більший опору навантаження, він буде складати тисячі мегаомів. При таких високих вхідних значеннях опору отримуємо високій рівень власних шумів мікрофону. Така особливість являється одним з мінусів конденсаторного мікрофону. Але шуми створюються переважно в області низьких частот, це дещо полегшує використання таких мікрофонів, адже на цих частотах музикальні та розмовні сигнали мають високий рівень [8].

1.8 Вугільні мікрофони

В вугільних мікрофонах постійний струм, яким живиться мікрофон, перетворюється в пульсуючий, в наслідок зміни опору вугільного порошку під дією змінного механічного тиску діафрагми. Вона коливається через дію на неї звукового тиску. Змінна складова струму створює падіння напруги на навантаженні. Співвідношення цієї напруги до звукового сигналу буде характеризувати чутливість мікрофону. Чим більша постійна складова струму через мікрофон, тим більша чутливість мікрофону. При передачі розмови, рівень вихідної напруги в цих датчиках близький нуля ($U_0 = 0,775$ В).

В частотному діапазоні 400 – 2500 Гц частотна характеристика вугільного мікрофону наближена до оптимальної для передачі розмови. Частотний діапазон найкращих мікрофонів не перевищує 300 – 3400 Гц. Нелінійні викривлення в нього дуже великі. На низьких частотах коефіцієнт нелінійних викривлень наближається до 15 – 20%. Динамічний діапазон не перевищує 30дБ.

На нижніх частотах він обмежений власними шумами, що створюються завдяки змінним контактам між вугільними зернами, а на високих – різкою зміною опору між контактами зерен, іноді навіть розриву електричного кола [8].

РОЗДІЛ 2 ОПИС АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ ТА ПРИЛАДІВ ДЛЯ ЇХ ПЕРЕТВОРЕННЯ

2.1 Опис акустичних сигналів

Коли йде розмова про акустичні сигнали та звуки ми часто маємо справу з індивідуальним відчуттям «хорошого звуку», що формується особистим опитом та оцінкою звучання по суб'єктивним критеріям.

При роботі з акустичними сигналами їх поділяють на два види, це первинний та вторинний звуковий сигнал. До первинного звукового сигналу відносять сигнали, що створюються співом, ромовою, музикальними інструментами та шумовий сигнал. Первинний сигнал також називають вихідним сигналом. До вторинного сигналу – відносять той сигнал, що відтворюється електроакустичними пристроями, тобто первинний сигнал, що зазнав обробку електроакустичними пристроями.

До параметрів, що характеризують акустичний сигнал відносять динамічний діапазон, форму спектра та частотний діапазон на якому він розташований, рівень сигналу в частотному та часовому уявленнях, час кореляції та середнє значення рівнів.

Розглянемо основні поняття, що характеризують первинний акустичний сигнал [8].

2.1.1 Динамічний діапазон

Акустичний сигнал являє собою сигнал, що постійно змінюється в часі. Інтервал таких змін може бути досить широким. Динамічним діапазоном називають різницю між максимальним та мінімальним рівнем сигналу по потужності.

На рисунку 2.1 зображена залежність рівня сигналу від часу. Він називається рівнеграмою. Зазвичай її дають для рівня, що визначений при постійному часі

вимірювання. Він становить 150-200мс при суб'єктивні рівнерамі, або 20-30мс при об'єктивній .

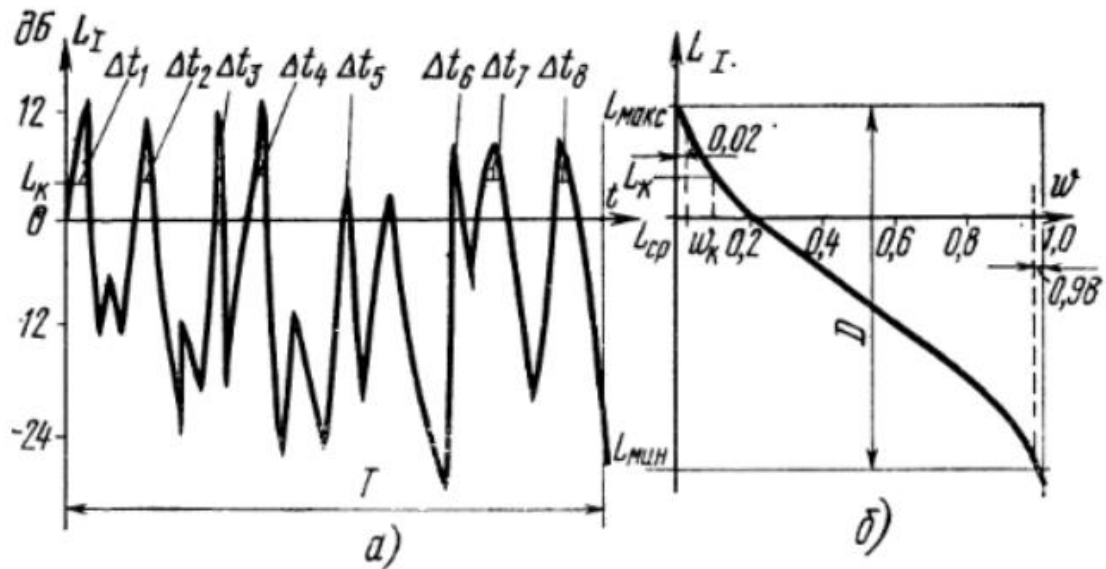


Рисунок 2.1 Визначення динамічного діапазону

а) рівнеграма; б) побудова інтегрального розподілення на ній

Оскільки рівень сигналу змінюється, як правило, по випадковому закону, то його інтегральне розподілення та середнє значення можна визначити наступним чином. Для прикладу візьмемо будь який рівень L_k . Можна записати, що його час не нижче L_k визначиться сумою $\tau = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \dots + \Delta t_n$, в якому Δt_n – часовий інтервал дії сигналу. Відповідно, відносний час знаходження рівня сигналу дорівнює $\omega_k = \tau_k / T$, де T – тривалість всього відрізка сигналу(вона повинна мати достатню тривалість, для музики 1мин, для розмови 15с). Таким чином ми можемо побудувати криву інтегрального розподілення рівня для даного сигналу.

Визначено, що середнє розподілення, отримане для первинних музикальних та розмовних сигналів, по формі близькі до нормального розподілення. Введені поняття квазімаксимального та квазімінімального рівня сигналу L_{\max} та L_{\min} . Їх знаходять по відносному часі перебування рівня сигналу над відповідним рівнем. Для квазімаксимального цей час дорівнює 2% для музикального, та 1% - для голосового сигналу. Квазімінімальний час дорівнює 98% та 99% відповідно. Вибір

саме таких значень обґрунтований саме тим, що найбільш короткі піки та різкі мінімуми сигналів не сприймаються слухом. Різницю між квазімаксимальним та квазімінімальним рівнем і називають динамічним діапазоном.

$$D = L_{\text{макс}} - L_{\text{мін}}$$

Для визначення розмірності величини, що характеризує динамічний діапазон сигналу, використовують децибелі(дБ). Він дорівнює 20 десятковим логарифмів від квадрата максимальної різниці рівнів сигналу. Гучність звуку являється лише суб'єктивним поняттям, на практиці рівні гучності також вимірюють в децибелах.

Приклади динамічного діапазону для різних видів сигналу:

- Розмова диктора – 25-35;
- Телефонна розмова – 35-45;
- Невеликий ансамбль – 45-55;
- Симфонічний оркестр – 65-75.

З прикладу видно, що динамічний діапазон, в більшості випадків, досить широкий і він не може бути переданий через акустичні тракти без попередньої обробки, тобто стискання(компресії), динамічного діапазону [8].

2.1.2 Середній рівень

Середній рівень інтенсивності сигналу можна визначити декількома способами. Це по слуховому відчутті(суб'єктивне середнє значення), середній статистичний по інтенсивності для тривалих інтервалів часу(середнє тривале), або як середній, вимірюваний прибором, що має невелике значення постійної часу(об'єктивне середнє). Для вторинних сигналів достатньо визначити лише середній рівень по відчуттю, коли як для первинного сигналу потрібно знати всі середні рівні, тому що ці сигнали надходять до людини через пристрої систем зв'язку та сповіщення.

Ці середні значення можливо виміряти, змінюючи постійну часу пристрою. Якщо врахувати, що миттєва потужність сигналу змінюється від нуля до амплітудного значення, то мінімальна постійна часу пристрою, для вимірювання об'єктивного середнього рівня, не повинна бути меншою максимального півперіоду коливання (для $f = 30\text{Гц}$, $\frac{T_{\text{макс}}}{2} = 17\text{мс}$). Так як постійна часу слуху в середньому дорівнює 150мс , то для вимірювання середнього рівня по слуховому відчутті постійна часу повинна бути приблизно 150мс . Для отримання тривалого середнього рівня постійну часу пристрою беріть рівній 15с для розмови та 1хв – для музики.

Для кожного середнього значення рівня середня інтенсивність визначається за формулою:

$$I_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{t_0} f(t) e^{-\frac{t_0-t}{T}} dt$$

Де $-\frac{t_0-t}{T}$ – враховує процес реєстрації сигналу з урахування «пам'яті» пристрою внаслідок наявності в нього постійної часу; T – постійна часу; $f(t)$ – часова залежність інтенсивності сигналу.

Середній акустичний рівень сигналу:

$$L_{\text{cp}} = 10\lg(I_{\text{cp}}/I_0)$$

Зазвичай акустичний сигнал перетворюється в електричний. В цих випадках на виході електроакустичного пристрою електричний рівень дорівнює:

$$N_e = 10\lg(P_e/P_0)$$

Де P_e – потужність сигналу(електрична); $P_0 = 1\text{ мВт}$ – потужність, що відповідає нульовому рівні.

Різниця між квазімаксимальним та середнім рівнем (за тривалий проміжок часу, для прикладу візьмем 15с , для розмови становить 1с , та 1хв – для музики) називають пік-фактором.

$$\Pi = L_{\text{макс}} - L_{\text{сер}} = N_{\text{е.макс}} - N_{\text{е.сер}}$$

Пік-фактором зображає наскільки нижче потрібно брати середній рівень передачі по відношенню з максимальним допустимим рівнем в каналі, щоб не перевантажувати його. Для музикальних сигналів пік-фактор сягає 20Дб та більше. Для розмовного сигналі він не перевищує 12Дб. Ці данні пік-фактору відносяться до сигналу, що не проходив обробку, в тому числі і в вигляді впливу акустичних властивостей приміщення [8].

2.1.3 Частотний діапазон та спектри

Кожний акустичний сигнал можна розглянути в вигляді значень його рівня в кожний момент часу. Така форма називається – імпульсною. Інша форма – частотна. Вона полягає в тому що сигнал розглядають, як безперервна сукупність гармонічних коливань. На практиці часові інтервали, на яких визначають спектр сигнал, обмежений в часі, але формально визначення спектру є спеціальне інтегральне рівняння, що виконується на нескінченно великому відрізку часу.

Частотна характеристика сигналу – залежність амплітуди гармонічного сигналу від частоти. Частоті характеристики реальних сигналів з підвищенням частоти знижуються. Поняття полоси частоти сигналу являє собою інтервал, в якому рівень частотних компонентів перевищує задане значення, наприклад 60 дБ. За межами цього інтервалу значення рівня частотних складових сигналу приймають за 0.

До часових(імпульсних) характеристик відносять хвильову форму сигналу та час кореляції. Кореляція представляє собою досить важливий параметр, запозичений з теорії ймовірності. Проблема в тому, що кожен інформаційний сигнал варто розглядати як випадковий процес. Білий шум – випадковий сигнал, в якому кожен наступний рівень сигналу ніяк не залежить від попереднього. Він має нульове середнє значення розходу сигналу та безкінечно широкий спектр. Справжні сигнали відрізняються від нього лише тим, що наступні значення залежать ввід попередніх. Ця залежність називається кореляцією, а середнє значення інтервалу часу, в межах якого залежність сигналу зберігається – часом

кореляції. Він визначає час взаємодії(інтерференції) з відбитими сигналами, відповідно і інтенсивність інтерференційних завад.

Хвильова форма сигналу надає можливість виявити різкі переходи інтенсивності звукового сигналу.

Акустичний сигнал від кожного з первинних джерел звуку має постійно змінну форму та склад спектру. Вони можуть бути високочастотними, низькочастотними, дискретними та цільними. В кожного з джерел звуку спектри мають індивідуальні особливості, що надають звучанню характерний окрас. Його називають тембром. Існують поняття тембру музикальних інструментів, таких як скрипки, тромбону, органу, та тембр голосу – дзвінкий(коли виділені високочастотні складові), глухий(коли високочастотні складові подавлені). В першу чергу інтерес являє середній спектр для джерел звуку кожного джерела сигналу, а для оцінки викривлень сигналу – спектр, усереднений за тривалістю сигналу (15 для інформаційних сигналів та 1хв для художніх). Усереднений сигнал, як правило, цільний і достатньо викривлений по формі.

Цільні спектри характеризуються залежністю спектральної щільності від частоти(енергетичний спектр). Спектральною щільністю називають інтенсивність звуку в полосі частот. Для акустики її беруть рівній 1Гц.

$$J = I_{\Delta F} / \Delta f$$

Де $I_{\Delta F}$ – інтенсивність, що виміряна в вузькій полосі частот Δf з допомогою вузькополосних фільтрів.

Для зручності оцінки введена логарифмічна міра щільності спектру, що схожа рівню інтенсивності. Вона називається рівнем спектральної щільності або спектральним рівнем.

$$B = 10 \lg(J/I_0)$$

Де $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м² – інтенсивність, котра відповідає нульовому рівні, як і для оцінки рівня інтенсивності.

Часто для характеристики спектру замість спектральної щільності використовують інтенсивність і рівні інтенсивності, що виміряні в октавній, пів-октавній ба полосі частот що дорівнює одній третій октави.

Спектральний рівень – залежність між спектральним рівнем та рівнем в октавній(пів-октавній та в полосі, що дорівнює третій частині октави) полосі

$$B = 10\lg(I_{\Delta f_{\text{окт}}} / \Delta f_{\text{окт}} I_0)$$

а рівень в октавній полосі

$$L_{\text{окт}} = 10\lg(I_{\Delta f_{\text{окт}}} / I_0)$$

де $\Delta f_{\text{окт}}$ – ширина відповідної октавної полоси .

$$L_{\text{окт}} - B = 10\lg \Delta f_{\text{окт}}$$

Наведем приклад частотних діапазонів для ряду первинних джерел акустичного сигналу, Гц:

- розмова 70-7000
- скрипка 250-15000
- орган 20-15000
- симфонічний оркестр 30-15000

Якщо спектри мають плавний спад в ту чи іншу сторони, то для них ще оцінюють тенденцію спаду. Тобто середній нахил спектральних рівнів в стороні низьких або високих частот.

В реальних системах можливі різні порушення точності передачі сигналу через електроакустичні тракти. До основних порушень належать завади та викривлення, втрата акустичної перспективи, обмеження рівня динамічного та частотного діапазону та зміщення рівня сигналу. Тому головною задачею електроакустичних систем, в тому числі і системи обробки звуку, є досягнення максимальної схожості первинних та вторинних сигналів. Первинний акустичний сигнал має широкий спектр, і для його правильної передачі електроакустичний тракт повинен мати достатньо широкий діапазон частот. Система обробки при цьому повинна також працювати в таких діапазонах.

При записі акустичного сигналу існує таке поняття як час реверберації. Це час за який, після відключення джерела сигналу, звук в приміщенні, затухає в 1000 раз, тобто на 60дБ. При перевищенні меж цієї величини знижується чіткість розмови та «прозорість» музики.(Для розмови він становить 1,2с., для музики – 2с.).

Також слід розрізняти ранні та пізні відбивання. Границя між ними становить близько 50мс. для розмови, та 80 мс. для музики від моменту надходження прямого звуку. При обробці звукового сигналу варто враховувати, що в приміщенні час реверберації має частотну залежність, тобто впливає на тембр звуку.

До акустичних сигналів відноситься також акустичні шуми. На малюнку 2 представлені спектри трьох типів шумів: білого, розового та розмовного

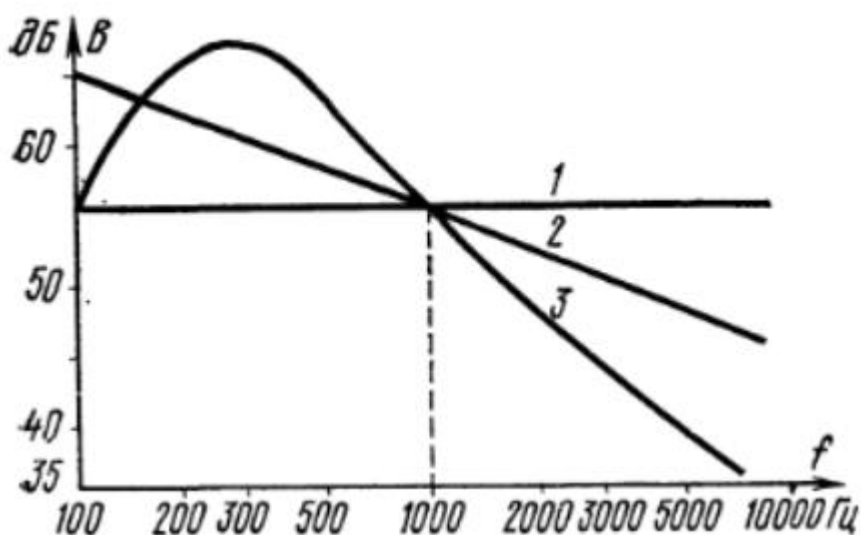


Рисунок 2.2 – Спектральні рівні шумів (1-білий; 2-розовий; 3- розмовний)

Термін «білий» відноситься до шумів, що мають однакову спектральну щільність на всьому часовому діапазоні, «розові» - до шумів з тенденцією спадання щільності на 3дБ/окт в сторону високих частот. Розмовні шуми – це ті шуми, що створюються одночасно розмовою декількох чоловік [8].

2.1.4 Первинний розмовний сигнал

Кожній людині властива своя манера вимови розмовних звуків. Вимова розмовних звуків, залежить від наголосу, звуків які знаходяться поряд та інше. Не зважаючи на всю різноманітність в вимові звуків –фізична реалізація обмеженої кількості узагальнених розмовних звуків називають фонемами. Фонема – це те що людина бажає вимовити, а звук – те що по факту в нього виходить вимовити. По принципу дії і взаємозв'язку це схоже на букву та на її письмову версію, тобто різне написання кожної букви окремою людиною.

Звуки поділяють на дзвінкі та глухі. Дзвінкі звуки утворюються з допомогою голосових зв'язок, що знаходяться під навантаженням. Період повторення імпульсів, що утворюються під потоком повітря, який виходить з легень, називають періодом основного тону голосу T_0 , а оберненою величиною – частотою основного тону $f_0 = 1/T_0$. Якщо в людини голосові зв'язки тонкі та сильно напружені, то отриманий період буде короткий, а частота основного тону – високою. Та навпаки, для товстих, слабо навантажених зв'язок частота основного тону являється низькою. Вона, не залежно від голосу знаходиться в діапазоні від 70 до 450Гц. При розмові частота постійно змінюється в залежності з наголосом, емоціями і т.д.

Інтонація – зміна частоти основного тону. Кожна людина має свій діапазон зміни частоти основного тону та свою інтонацію. Інтонація має велике значення для розпізнавання особи що говорить. На основного тону, інтонації, усного «почерку» та тамбру голосу розробляють системи розпізнавання особи. При цьому рівень розпізнавання вище ніж по відбиткам пальців.

Імпульси основного тону мають пилкообразну форму, через це при їх періодичному повторенні отримуємо дискретний спектр з великою кількістю гірмонік (до 40), частоти яких кратні частоті основного тону.

При вимові глухих звуків голосові зв'язки перебувають в розслабленому стані і потік повітря з легень вільно надходить в порожнину роту. Зустрічаюся з різними завадами в вигляді язика, зубів, губ він утворює звихрення. В наслідок цього створюється шум, що має цільний спектр.

При вимові звуків частини ротової порожнини(язик, губи, зуби, нижня щелипа) знаходиться в певному положенні або русі. Ці рухи називають артикуляцією органів розмови. При цьому створюються певні, для даної фонemi, резонансні порожнини, а для цільного звучання фонем при розмові визначені переходи від однієї форми тракту до іншої.

Під час розмови через розмовний тракт людини проходить тональний імпульс або шумовий сигнал, або перше і друге разом. Розмовний тракт являє собою досить складну систему фільтрів з декількома резонаторами які утворюються завдяки порожнинам роту, носу та носоглотки. В наслідок – тональний або шумовий спектр з монотонною огинаючою перетворюються в спектри з рядом максимумів та мінімумів. Форманта – максимум цього спектру, а мінімум та нульові значення називають фнтиформантами. Огинаюча спектр для кожної фонemi має інтividуально визначену форму. Під час розмови її спектр постійно змінюється, в наслідок чого утворюються формантні переходи. Частотний діапазон розмови знаходиться в діапазоні від 70 до 7000 Гц.

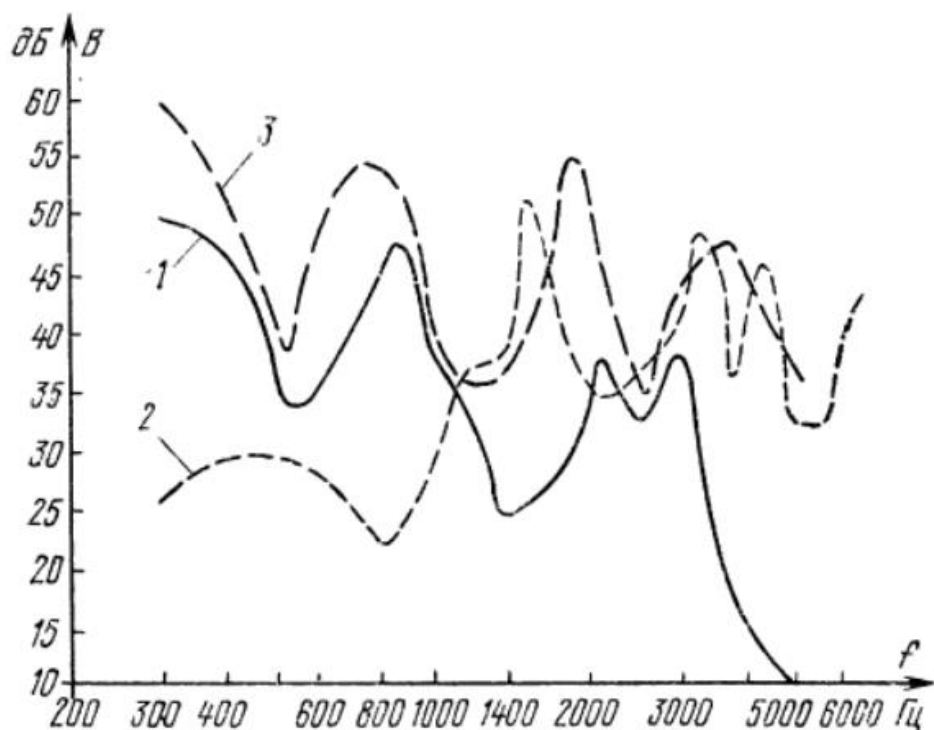


Рисунок 2.3 – Спектральні криві звуків мови
(1 – «В»; 2 – «Г»; 3 – «М»)

Дзвінки звуки, в особливості голосні, мають високий рівень інтенсивності. В той час як глухі – низький. В процесі вимови, гучність розмови постійно змінюється. Це добре помітно при взривних звуках. Динамічний діапазон знаходиться в межах 35 – 45 дБ. Голосні звуки мають тривалість, в середньому, 0,15 с., приголосні – біля 0,08с., звук «п», наприклад біля 30мс. Велика тривалість голосних звуків потрібна для перебудови положення артикуляційних органів, в протилежному випадку язик буде «заплітатися».

Під час розмови звуки не несуть однакове інформативне навантаження. Голосні звуки несуть меншу інформативну цінність в розмові чим приголосні.(так наприклад в слові «посилка» голосні звуки «о», «и», «а» майже не передають інформацію, а звуки «п», «с», «лк» - несуть на багато більшу інформативну цінність). Така система інформативності звуків при розмові призводить до того, що знижується чіткість та розуміння сигналу при виниканні шумів, в першу чергу через маскування глухих звуків [8].

2.1.5 Вторинний сигнал

В ідеальному випадку вторинний сигнал повинен в точності повторювати первинний, але така точність не завжди потребується адже слух людини може не помічати різниці між ними, до того ж на практиці, точна відповідність сигналів не можлива. Порушення точності передачі, що можливе для розпізнавання за допомогою слухом бувають наступними:

- Втрата акустичної перспективи. При передачі звуку по одноканальній системі отримуємо відчуття слуху з допомогою одного вуха, навіть при наявності декількох мікрофонів в приміщенні та при рознесенні вторинних джерел вторинного сигналу. Цей дефект частково усувають з допомогою стереофонічної системи, що оснований на багатоканальній системі передачі сигналу;
- Зміщення рівня. Під час передачі сигналу по трактах не передається інформація про абсолютні рівні звучання первинного сигналу. Слухач має

можливість встановлювати рівень вторинного сигналу. Він призводить до зміни співвідношення між гучністю низьких та високих частот.

- Обмеження динамічного діапазону. Оскільки при передачі сигналу по звуковим трактам виникають шуми на нижній частині та перегрузки на верхній частині діапазону то сигнал зжимають. Дифект може бути частково виправлений розширенням динамічного діапазону сигналу в кінці тракту. Але це може бути не завжди реалізовано, так як для цього в кінці тракту потрібно знати на скільки був стиснений сигнал з початку. Крім того спроба розширити діапазон, з допомогою експандерів, збільшує складність апаратури.
- Обмеження частотного діапазону. Часто трапляється так, що акустичний тракт не в змозі передати весь частотний діапазон первинного сигналу, це призводить до схожих проблем з динамічним діапазоном.
- Завади. Під час передачі на сигнал накладываются різні завади, в тому числі шуми електричного і акустичного джерела виникнення. Акустичні завади спостерігаються як при надходженні первинного сигналу, так і при надходженні до слухача.
- Викривлення. До них відносять лінійні, не лінійні, параметричні та перехідні(часові) викривлення [8].

2.1.6 Шуми та завади

Вплив шумів та завад на сигнал оснований на маскуванні вторинного акустичного сигналу незалежно від того акустичну чи електричну природу вони мають. Шуми зміщують поріг розпізнавання, який не залежить від часу, якщо шуми відносять ся до «гладких». Вони мають пік-фактор, що не перевищує 6дБ. До них відносяться різні флуктуаційні шуми, наприклад шуми дробового ефекту, розмовні шуми від декількох дикторів, що розмовляють одночасно. Імпульсні шуми, в свою чергу, створюють поріг чутності, що змінюється в часі в залежності

від пік-фактора шуму та тривалості імпульсів. Окрім маскуванню сигналу вони також викривляють його, створюючи комбінації частоти сигналу та шуму.

Спектр електричних шумів близький до рівномірного, а акустичних – ближчий за структурою до розмовного. По цій причині частотна залежність порогу чуття для електричних шумів має тенденцію росту до високих частот, тому що ширина критичних поліс зростає зі збільшенням частоти. Для розмовних шумів поріг чуття майже не залежить від частоти.

Індустріальні, атмосферні та стаціонарні завади, окрім тональних, можуть відноситись до імпульсних та гладких, з рівномірним або низькочастотним спектром. Крім цих завад потрібно також враховувати завади від саомаскування розмови, коли слабкі звуки маскуються голосними, що йдуть слідом.

Проблеми акустичного шуму вирішуються шляхом прибиранням або послабленням впливу джерела шуму, та підвищення звукоізоляції приміщення [8].

2.1.7 Лінійні викривлення

В загальному випадку коефіцієнт передачі тракту

$$K = \frac{p_2}{p_1} = |K|e^{i\varphi}$$

де p_1 та p_2 – звуковий тиск на початку та в кінці тракту, $|K|$ - модуль коефіцієнта передачі, φ – фазове зміщення в тракті.

Коефіцієнт передачі залежить від частоти, тому що слух не реагує на пряму на зміщення фаз між складовими сигналу, далі його не будемо розглядати. Під терміном «коефіцієнт передачі» будемо розуміти його модуль.

Частотна характеристика тракту – залежність коефіцієнта передачі. Вона призводить до зміни співвідношення між амплітудами частотних складових, що входять до первинного сигналу. При зменшенні низькочастотної складової первинного сигналу отримуємо дзвінке звучання, а при зменшенні низькочастотних – отримуємо глухий звук. Під час виділення низьких частот отримуємо «бубнящий» звук, виділяючи високі частоти – свистящим. Ці

викривлення характеризуються величиною нерівномірності частотної характеристики.

$$M_H = K_{\text{макс}} / K_{\text{мін}}$$

$K_{\text{макс}}$ та $K_{\text{мін}}$ – максимальний та мінімальний коефіцієнт передачі в заданому діапазоні частот.

Нерівномірність вимірюють в логарифмічних одиницях:

$$\Delta L = 20 \lg * M = L_{\text{макс}} - L_{\text{мін}}$$

де $L_{\text{макс}}$ та $L_{\text{мін}}$ – максимальний та мінімальний рівень вторинного сигналу при постійній рівня первинного.

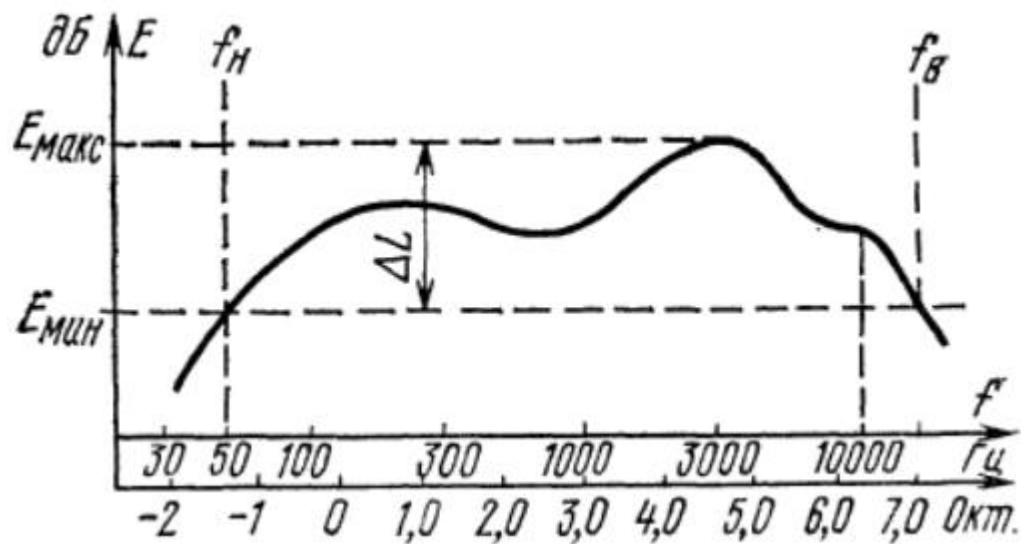


Рисунок 2.4 – Визначення нерівномірності частотної характеристики та частотного діапазону сигналу

Частотна характеристика найбільш не рівномірна в межах самих низьких та самих високих частот діапазону. По цій причині під час використання широкополосних трактів передачі, нерівномірність характеристик задають в двох діапазонах : номінальному та основному.

Експериментальними методами було виявлено, що викривлення більш помітне на низьких частотах ніж на високих [8].

2.1.8 Не лінійні викривлення

Розрізняють два види не лінійності: не лінійність степінного типу та не лінійність через амплітудне обмеження. Перші характеризуються залежністю

$$y = A_1x + A_2x^2 + \dots + A_nx^n$$

Де A_n - коефіцієнти пропорційності, x – миттєві значення первинного сигналу, y – миттєве значення вторинного сигналу

Амплітудне обмеження може бути центральним (з низу) та зверху. При обмеженні сигналу зверху характеристика тракту до певного значення x_0 може бути лінійною. Під час використання центрального обмеження слабкі сигнал(менші x_0) зрізаються, а інші викривляються.

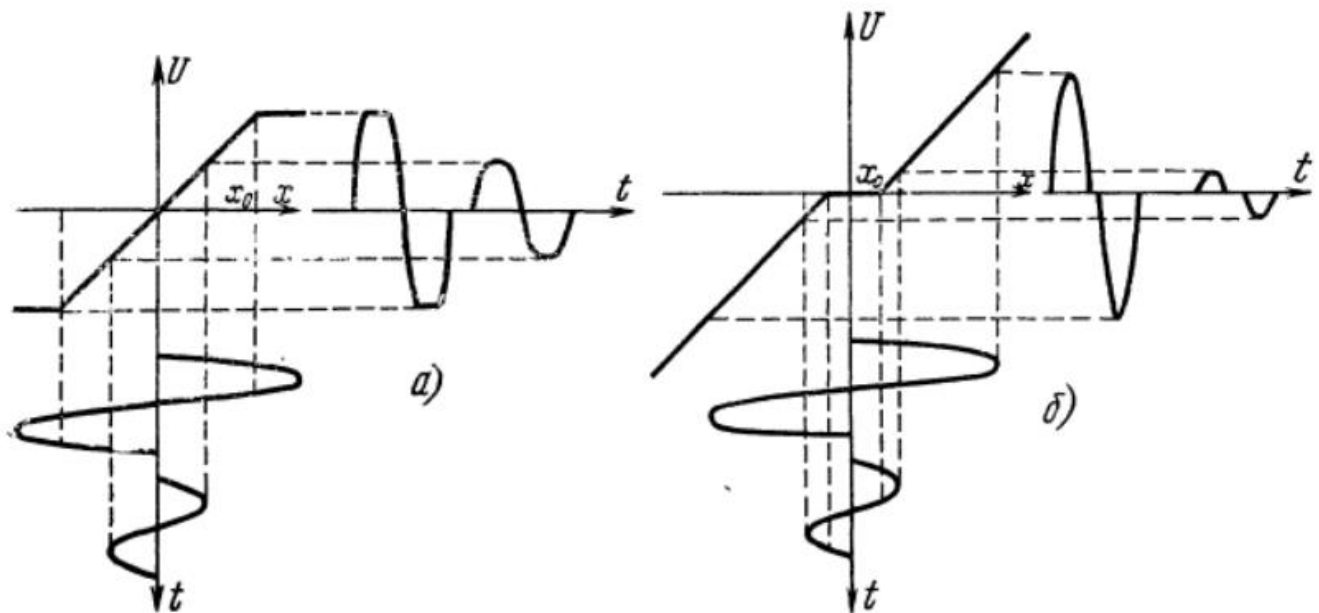


Рисунок 2.5 – Амплітудне обмеження для сигналів з великою та не великою амплітудою

а) Обмеження зверху б) обмеження з низу (центральне)

Викривлення, що спричинені амплітудним обмеженням зверху, заважають сприйняттю сигналу менше, а при центральному обмеженні – більше ніж викривлення степінного типу в вигляді гармонічних складових викликають дребезг(а на високих частотах - хрипи), а нелінійні викривлення в вигляді різності

тональності визивають відчуття модуляції гучності звуку, це гарно помітно на низьких частотах.

Не лінійні викривлення мають великі показники на низьких частотах, тому для них надаються норми на декількох діапазонах частот. Вони характеризуються формулою, що показує коефіцієнт нелінійних викривлень(КНВ):

$$K_{н.в.} = \sqrt{x_{m2}^2 + x_{m3}^2 + \dots} / x_{m1}$$

де x_{mk} – амплітуда гармонік сигналу, що починаються з другої; x_{m1} – амплітуда основної складової [8].

2.1.9 Перехідні викривлення

При стисканні динамічного діапазону використовують різноманітні автоматичні регулятори рівня. Вони мають велику постійну часу відновлення та викликають викривлення, що називаються перехідні. Вони утворюються власними коливаннями, які створюються в різних частинах тракту. По звучанню перехідні викривлення подібні нелінійним викривленням, тому що в сигналі з'являються комбінаційні частоти [8].

2.1.10 Критерії оцінки звучання

Специфічною особливістю всіх процесів обробки звуку є то, що найважливішим етапом виступає суб'єктивна оцінка якості звуку. Це, в свою чергу, обґрунтовано тим, що набір об'єктивних параметрів, котрі використовуються в даний момент, неоднозначно характеризує «слуховий образ», що сприймається слухачем. До цих параметрів належить діапазон частот, рівень нелінійних викривлень, нерівномірність амплітудо-частотної характеристики.

В зв'язку з цим, суб'єктивна експертиза є головним критерієм оцінки отриманого результату обробки сигналу та обов'язковою процедурою на всіх етапах запису та обробки сигналу. Вона залежить від багатьох факторів, до яких входить вибір текстових програм, методика вибору та обробка результатів, параметри приміщення.

Для запису музики висока якість звукового сигналу характеризується чистоти та прозорості звуку, об'ємного звучання, рівня гучності, тембрового окрасу, балансу та подібних факторів. А для голосового сигналу одними з найважливіших критеріїв виступають Складова розбірливість (артикуляція) та рівень залежності гучності від сторонніх шумів

Складова розбірливість

Для голосового сигналу складова розбірність виступає одним з самих найголовніших суб'єктивним критерієм. Важливо розрізняти інформативну та художню розмови. До інформативної розмови належить оголошення, доклад та інші схожі типи. Для такого типу сигналу не так важливо передавати інтонацію розмовника. Для другого типу вона несе певний естетичний зміст. Іншими словами для розмови такого типу критерії запису та обробки сигналу досить схожі з музикальним сигналом. Розбірливість залежить від рівня гучності шуму та корисного сигналу а також акустичних властивостей приміщення.

Відзвук

Відзвуком називають звуковий сигнал, що залишається в приміщенні після вимикання джерела звуку. Він затухає через певний період часу. Це пов'язано з тим, що сигнал послідовно відбивається і сила сигналу слабшає з кожним відбиттям цього сигналу.

Тривалість відзвука – це час за який відзвук сприймається датчиком. Вона залежить від часу реверберації, рівня завад та звукового сигналу, а також від чутливості датчика та частоти сигналу.

Прозорість

Під прозорістю сигналу розуміють можливість одночасно відлічити інструменти та тональність сигналу, не зважаючи на відзвук приміщення. Межа часу для корисних, з точки зору прозорості та просторового враження перших відображень і відзвуку приміщення, складає приблизно 80 мс.

Просторове враження

Просторове враження виникає з слухового сприйняття в частково чи повністю закритому просторі.

Воно складається з ряду параметрів:

- Відчуття, що слухач знаходиться в одному приміщенні з джерелом звуку;
- Уявленні від розміру приміщення;
- Гулкість;
- Просторовість.

Гулкість

Гулкістю називають відчуття того, що окрім прямого звуку також присутній і відбитий звук, що сприймається не як повторення сигналу. В великих приміщеннях гулкість залежить від відношення пізньої енергії відзвуку до ранньої. До останньої відноситься енергія прямого звуку і відбиття, котрі при звучання голосу приходять приблизно за перші 50мс, а при звучанні музики – за 60мс після сприймання прямого звуку.

Ехо

Повторення звукового сигналу, при яких первинний та вторинний сигнали сприймаються в часі (в деяких випадках і в просторі), як самостійні слухові об'єкти. Якщо повторення сигналу спричинене відбиттям, то для роздільного його сприйняття необхідна затримка в часі приблизно 50мс., в залежності від виду сигналу. В випадках коли періодичні повторення сигналу настають так швидко один за одним, що не сприймаються вухом як окремі сигнали, говорять про багаторазове ехо [8].

2.2 Опис приладів для перетворення та обробки акустичних сигналів

2.2.1 Призначення та класифікація фільтрів

Під фразою «частотна корекція» розуміють підвищення або зниження рівня спектральних складових сигналу в вибраній полосі без додавання нових складових в вибрану полосу сигналу. Потреба частотної корекції виникає тоді коли ми

стикаємося з поганими акустичними властивостями приміщення в якому проводимо запис акустичного сигналу. Для прикладу тверда поверхня стін та підлоги може викликати дребізь, це в свою чергу спричинить втрату розбірливості звуку. Пристрої частотної корекції виступають в ролі об'єднуючих ланок між звучанням звуковідтворюючих систем та реакцією приміщення на аудіо сигнал.

Частотні коректори використовуються у всіх студіях звукозапису. Вони допомагають вирішити питання такі технічні питання як пониження низько частотного шуму , корекція амплітудо-частотних характеристик мікрофонів, обмеження полоси звукового тракту. Ці системи все частіше почали використовувати для вирішення творчих задач, таких як створення художніх звуків, надання звучанню нового забарвлення та інше.

В аудіотехніці використовують різноманітні пристрої та фільтри, що можуть бути виконані в вигляді програмного продукту або окремої апаратури, для корекції звукових сигналів. До них належать:

- Фільтри обмеження полоси частот
- Фільтри плавного підйому та спаду АЧХ
- Фільтри полос
- Фільтри «присутності»
- Графічні еквайзери
- Параметричні еквайзери
- Параграфічні еквайзери
- Кроссовери

Фільтри частотної корекції, по принципу дії поділяються на аналогові та цифрові. Аналогові, в свою чергу, можуть бути виконані на основі пасивних та активних елементів. За принципом роботи всі фільтри поділяють на лінійні та нелінійні. В залежності від виду імпульсної передатної функції фільтри поділяють на рекурсивні та нерекурсивні. Всі аналогові фільтри являються рекурсивними, натомість цифрові можуть буди двох типів.

Серед всіх існуючих фільтрів виокремлюють декілька видів, передавальна функція яких являється найбільш якісною. До них відносять:

- Фільтр Бесселя(найбільш гладка АЧХ та ФЧХ, але нахил спаду АЧХ найменший);
- Фільтр Баттерворта (має лінійну АЧХ та спад АЧХ – $6N$ дБ/октаву, де N – порядок фільтра);
- Фільтр Чебишева (не монотонна АЧХ, але спад АЧХ крутіший в порівнянні з фільтром Баттерворта. ФЧХ не монотонна, та має пік на частоті зрізу);
- Еліптичний фільтр (найкрутіший спад АЧХ, але наявні пульсації в полосі пропускання та полосі пониження. ФЧХ не монотонна).

По частоті пропускання фільтри поділяють на наступні групи:

- Фільтри низьких частот(виділяють частоти до частоти зрізу f_c , а інші понижують);
- Фільтри високих частот
- Смугові фільтри(виділяють смугу частот, що вище частоти зрізу f_{cl} та f_{ch} . Частоти що знаходяться нижче f_{cl} та вище f_{ch} - подавляють);
- Вузько-смугові фільтри (виділяють частоти поблизу частоти зрізу f_c)
- Вузько-смугові режекторні фільтри(подавлять частоти поблизу частоти зрізу f_c).

Обробка сигналів з допомогою цифрової апаратури почала проводитись відносно не давно, в силу своєї дороговизни, великих затрат ресурсів та складності. Сигнали оброблялися з допомогою аналогової апаратури, але така апаратура добавляла в сигнал сигнал частотний зсув(при проходженні певних частот через фільтр вони затримувалися).

Використання цифрової апаратури значно зменшило цей результат. Але вона також принесла в сигнал свої недоліки, які пов'язані з частотою дискретизації. З розвитком технологій ця проблема поступово зникає. Вже на

теперішній час в сучасних еквалайзерах використовується 24-розрядне квантування. Це допомагає збільшити частоту дискритизації до 96 – 192 кГц [9].

2.2.2 Базові цифрові фільтри

Для частотної корекції часто використовують 3 види цифрових фільтрів(фільтр плавного підйому/спуску АЧХ, смугові пропускні/затримуючі пікові фільтри та вузько-смугові пропускні/затримуючі пікові фільтри середніх частот.). Коефіцієнт таких фільтрів записують в логарифмічному масштабі.

Більшість обрізних фільтрів низьких та високих частот проектується на основі фільтрів низьких та висок частот, а також усіх пропускних фільтрів. Вони обмежують частотний діапазон сигналу.

Цифрові фільтри реалізуються на принципі роботи всього трьох елементів – затримка на один такт з передавальною функцією z^{-1} , двійковим суматором та множенням. Також при побудові використовують прямі та зворотні зв'язки. Їхні коефіцієнти позначають b_n та a_n відповідно.

Математично, робота таких фільтрів показує залежність вхідного та вихідного сигналів. Передавальна функція $H(z)$ визначається як відношення z образів вхідного $Y(z)$ та вихідного $Z(z)$ сигналів. Модуль функції – частотна характеристика, а фазова характеристика дорівнює аргументу цієї функції [9].

2.2.3 Фільтри низьких та високих частот 1го порядку

Самий простий фільтр низьких частот 1го порядку з одним нулем будується на основі одного елементу. В його схемі використовується прямий зв'язок, що допомагає прибавляти затриманий та прямий сигнал. Його схема зображена на рисунок 2.6.

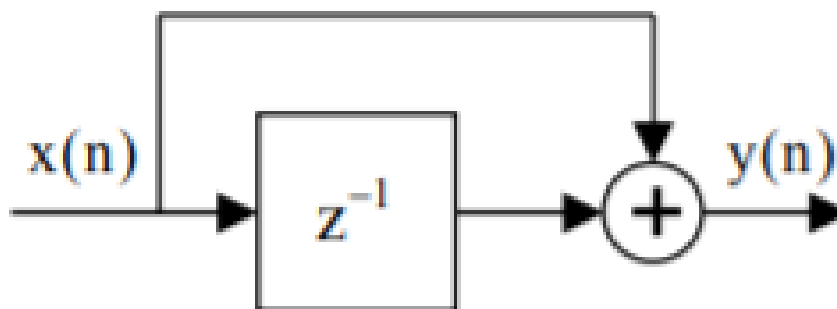


Рисунок 2.6 – Фільтр низьких частот першого порядку на основі одного елементу

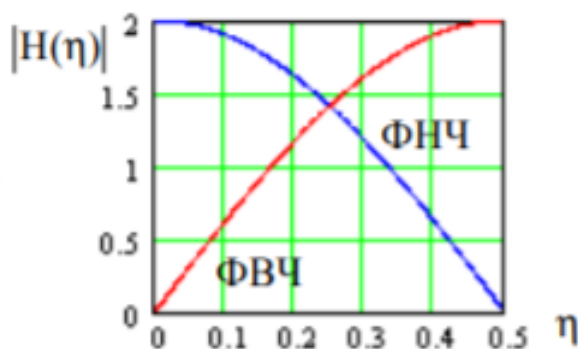


Рисунок 2.7 – Фазова характеристика ФНЧ першого порядку на основі одного елементу

Його робота описується різницеvim рівнянням:

$$y(n) = x(n) + x(n - 1)$$

Передавальна функція має вид:

$$H(\eta) = 1 + z^{-1}, \text{ для } \eta \leq 0.5$$

де $z = e^{j2\pi\eta}$ – оператор Z-перетворення, $\eta = f/f_c$ – відносна частота.

Частотна та фазова характеристики, в цьому випадку рахуються за формулами:

Частотна характеристика

$$|H(\eta)| = 2\cos(\pi * \eta)$$

Фазова характеристика

$$\arg[H(\eta)] = -\pi * \eta$$

Для того, щоб розширити можливості фільтра та отримання можливості зміни передавальної функції в нього включають два множники. Вони переймають роль коефіцієнтів b_0 та b_1

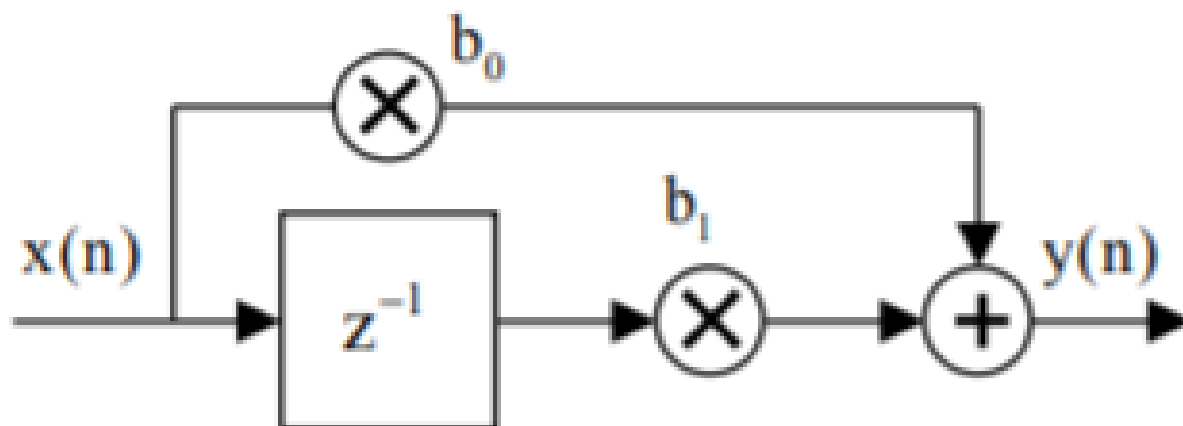


Рисунок 2.8 – Фільтр низьких та високих частот 1го порядку з коефіцієнтами b_0 та b_1

Передавальна функція

$$H(\eta) = b_0 + b_1 * z^{-1}, \quad \eta \leq 0.5$$

Z-перетворення

$$Y(z) = b_0 X(z) + b_1 * z^{-1} X(z)$$

Різницеве рівняння

$$y(n) = b_0 x(n) + b_1 x(n - 1)$$

Якщо налаштувати коефіцієнти так, щоб b_0 та b_1 дорівнювали 1, то ми отримаємо фільтр низьких частот. У випадку коли $b_0 = 1$, а $b_1 = -1$ – отримуємо фільтр високих частот. Його частотна та фазова характеристика буде дорівнювати:

Частотна характеристика

$$|H(\eta)| = 2\sin(\pi * \eta)$$

Фазова характеристика

$$\arg[H(\eta)] = \frac{\pi}{2} - \pi * \eta$$

2.2.4 Фільтри низьких та високих часто 2го порядку

Фільтр другого порядку з двома нулями. Будується на основі двох частин фільтра низьких/високих часток 1го порядку та використання прями зв'язків, рисунок 2.9

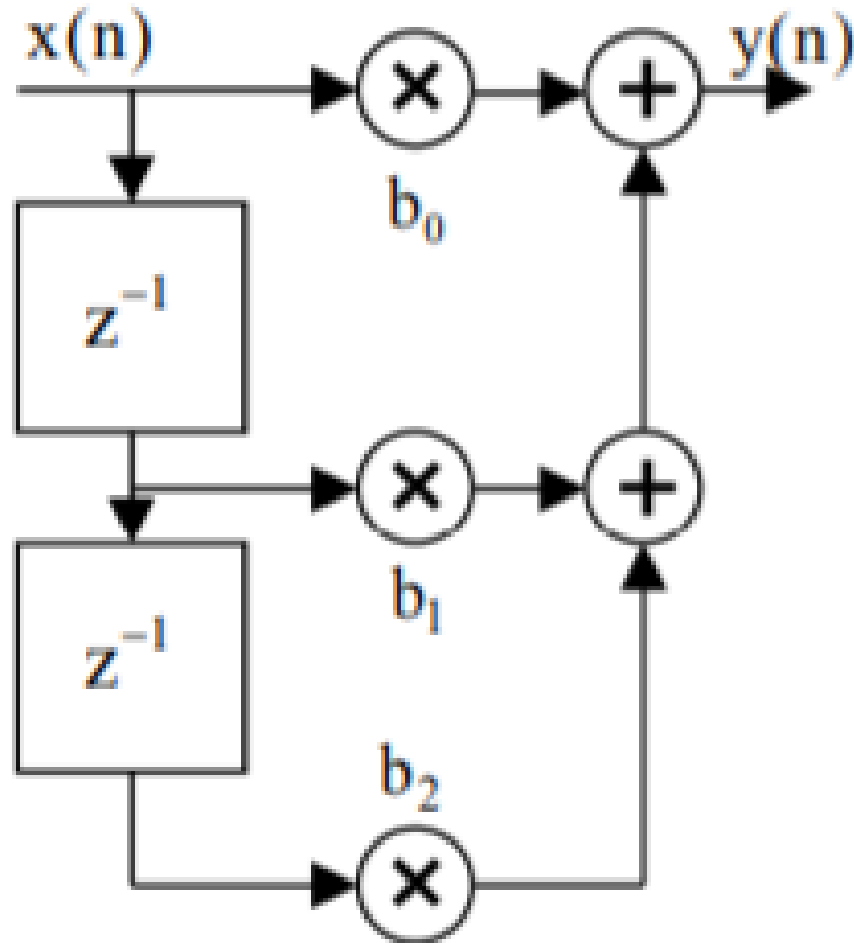


Рисунок 2.9 – Фільтр 2го порядку з двома нулями

Математичний опис роботи фільтру:

Передавальна функція

$$H(z) = b_0 + b_1 * z^{-1} + b_2 * z^{-2}$$

Z-перетворення

$$Y(z) = b_0 X(z) + b_1 * z^{-1} X(z) + b_2 * z^{-2} X(z)$$

Різницеве рівняння

$$y(n) = b_0 x(n) + b_1 x(n - 1) + b_2 x(n - 2)$$

Якщо $(b_1/2)^2 > b_2$ то рівняння можна представити в вигляді:

$$y(n) = b_0\{x(n) - [2R\cos(\theta_c)]x(n-1) + R^2x(n-2)\}$$

$$H(z) = b_0[1 - R\cos(\theta_c) * z^{-1} + R^2z^{-2}]$$

де $R = \sqrt{b_1/b_0}$, $R \leq 1$, $\theta_c = 2\pi\eta_c$, $\eta_c = f/f_c$, f_c – частота зрізу. Таке перетворення надає можливість підіймати амплітудно частотну характеристику в області високих частот ($\eta_c > 0,25$), підіймати АЧХ в області низьких частот ($\eta_c < 0,25$), та загороджувати частоти в сигналі ($\eta_c = 0,25$). R – визначає максимальний підйом характеристики на кінцях діапазону та затухання, що відбувається біля частоти зрізу. Зміна фази з частотою тим більша, чим ближче значення числа R до одиниці. На частоті максимального затухання фазовий зсув буде дорівнювати нулю [9].

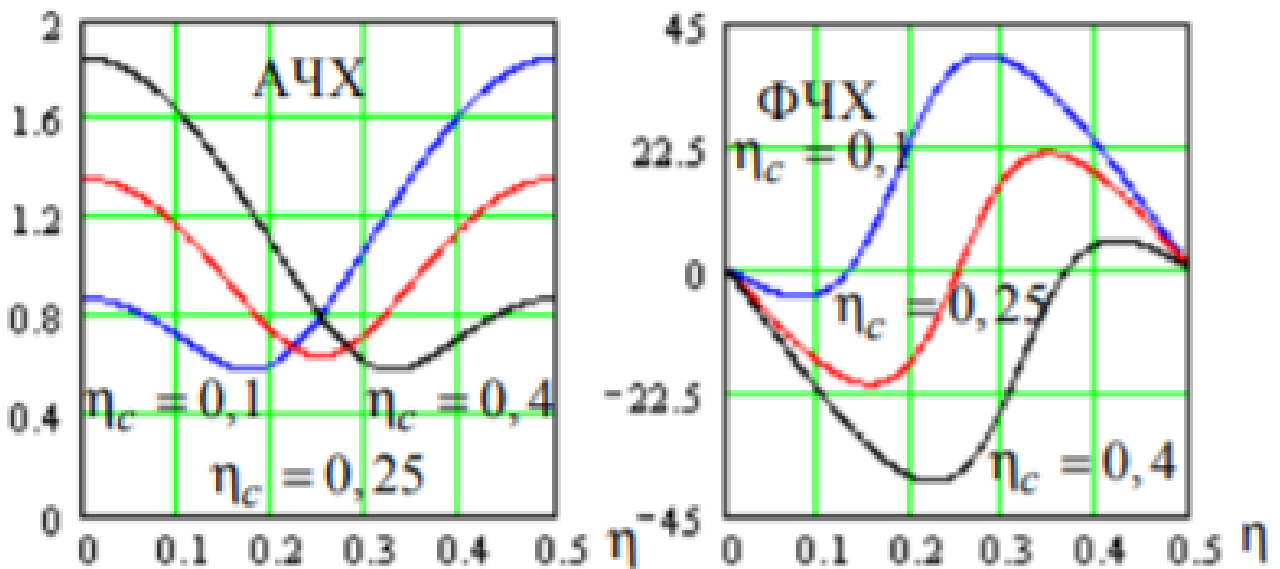


Рисунок 2.10 –Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики

2.2.5 Все пропускні фільтри 1 та 2 порядків

Всепропускний фільтр – основа для побудови параметричних фільтрів. Вони допомагають провести незалежну зміну частоту зрізу, доброті та пропускання. Оснований на одному або двох(використовується частіше) елементах затримки(рисунок 2.11). В ньому використовується прямий та зворотній зв'язок.

Робота фільтру характеризується рівнянням:

$$y(n) = c * x(n) + x(n - 1) - c * y(n - 1)$$

де $c = \frac{\tan(\pi\eta_c)-1}{\tan(\pi\eta_c)+1}$, $\eta_c = f_c/f_s$ – відносна частота зрізу.

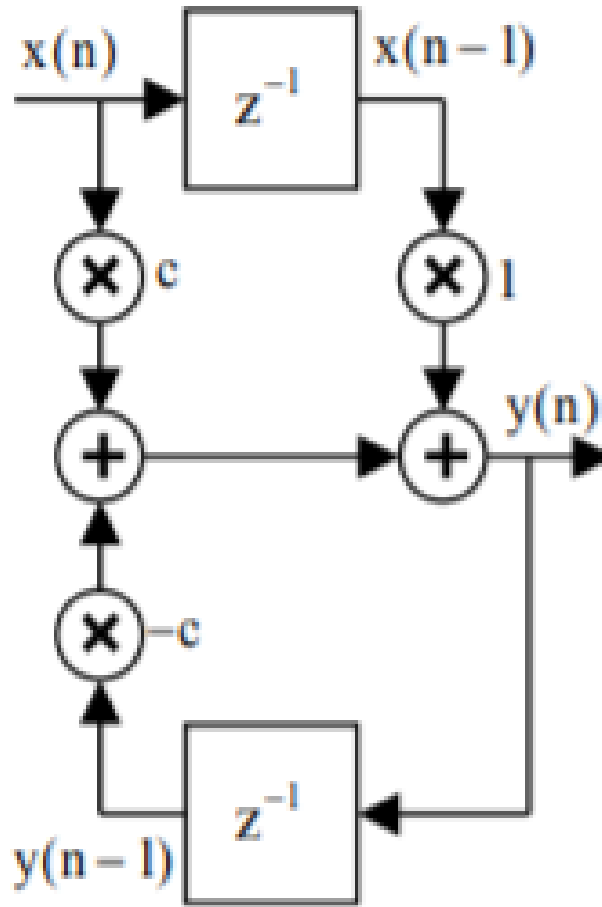


Рисунок 2.11 – Все пропускний фільтр 1го порядку.

Передавальна функція має вигляд:

$$A_1(z) = \frac{z^{-1} + c}{1 + c * z^{-1}}$$

Частотна характеристика в такому фільтрі не залежить від частоти сигналу, модуль коефіцієнта передачі дорівнює одиниці на всьому діапазоні частот в сигналі.

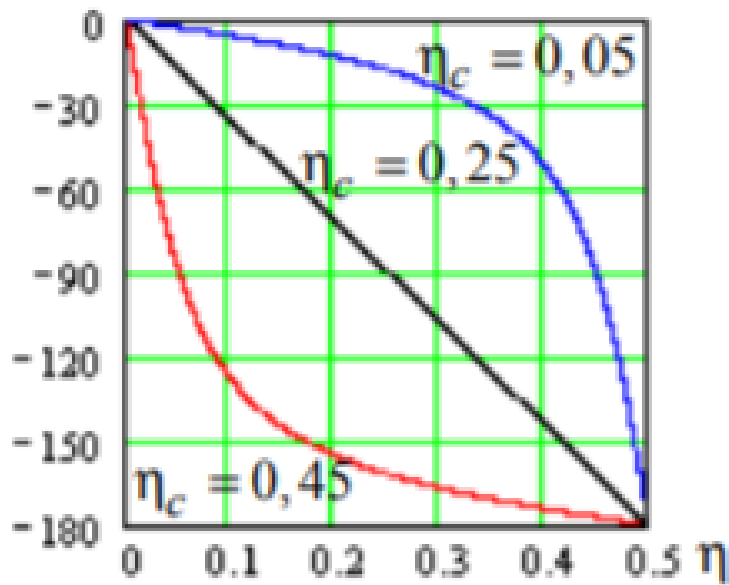


Рисунок 2.12 –Фазова характеристика все пропусного фільтру 1го порядку

2.2.6 Параметричні фільтри

Параметричні фільтри низьких та високих частот, смугові пропускні та режекторні фільтри будують на основі все пропускних фільтрів 1го та 2го порядку, додаванням додаткового прямого зв'язку.

Низько та високо частотні фільтри 1го порядку використовують все пропускний фільтр першого порядку(рисунок 2.11). Коли вихідний сигнал додається до вхідного – отримуємо фільтр низьких частот, коли віднімається – фільтр високих частот .Передавальна функція з плавною зміною частоти зрізу:

$$H(z) = 1/2(1 \pm A_1(z))$$

$$A_1(z) = \frac{z^{-1} + c}{1 + c * z^{-1}}$$

де $A_1(z)$ – передавальна функція все пропусного фільтру першого порядку, c – коефіцієнт, що відповідає за плавність зміни частоти зрізу фільтра.

Смуговий пропускний/загороджуючий фільтр, будується на основі все пропусного фільтру 2го порядку. Якщо сигнал додається – режекторний фільтр, віднімається – пропускний фільтр [9].

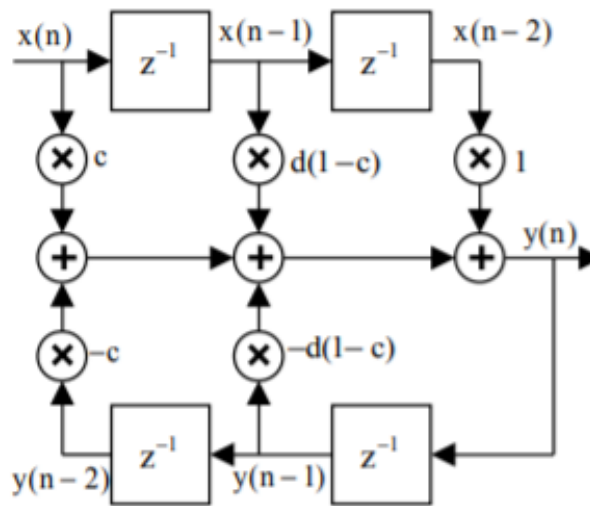


Рисунок 2.13 – Пропускний/загороджуючий фільтр 2го порядку

Передавальна функція:

$$(z) = 1/2(1 \pm A_2(z))$$

де $A_2(z)$ – передавальна функція пропускового фільтру 2го порядку

$$A_2(z) = \frac{-c + d(1-c)z^{-1} + z^{-2}}{1 + d(1-c)z^{-1} - c * z^{-2}}$$

Коефіцієнт c – змінює частоту зрізу, b – задає добротність

2.2.7 Кросовери

Пристрої, що розділяють вхідний сигнал на декілька частотних ліній, що відповідають частотним характеристикам чутливих елементів елементів відтворення звуку, називають кросовером.

Як відомо, не можливо створити пристрій відтворення звуку, що буде добре працювати в всьому частотному діапазоні сигналу(низьку, середні та високі частоти). Саме по цій причині більшість акустичних пристроїв оснащені декількома головками гучномовців. Сама велика – для відтворення низьких часто, а сама маленька – для високих частот. Але при відсутності розподілення сигналу на частоти потрібного діапазону, пристрої відтворення будуть працювати не коректно та в сигналі будуть з'являтися завади, що викликані не відповідності пристрою відтворенню, сигналу, що на нього надходить.



Рисунок 2.14 – Схема 3-х стрічкового кросовера

Кросовери поділяють на два типи: активні та пасивні. Пасивні – складаються з пасивних фільтрів, що підключені до виходів підсилювача потужності сигналу. Вони подають сигнал безпосередньо на пристрою відтворення. Ці фільтри складаються з котушок індуктивності та конденсаторів. З метою збільшення коефіцієнту передачі фільтрів необхідно, щоб опір елементів, з яких він складається був максимально малим. Це призводить до збільшення габаритів та вартості.

Активні кросовери, в свою чергу, складаються з транзисторів чи мікросхем(активних компонентів). Вони підключаються перед підсилювачем, та подають на нього вже відокремлений сигнал. Вони мають ряд технічних та економічних переваги, в порівнянні з пасивними кросоверами, тому мають досить широке застосування [9].

РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРОБКА МАКЕТУ

3.1 Опис приладів, що використовувалися в роботі

За основу для розробки системи обробки акустичних сигналів було взято плату-контролер Arduino ONU R3 на базі мікроконтроллера ATmega328. На Рисунок 3.1 зображено його зовнішній вигляд

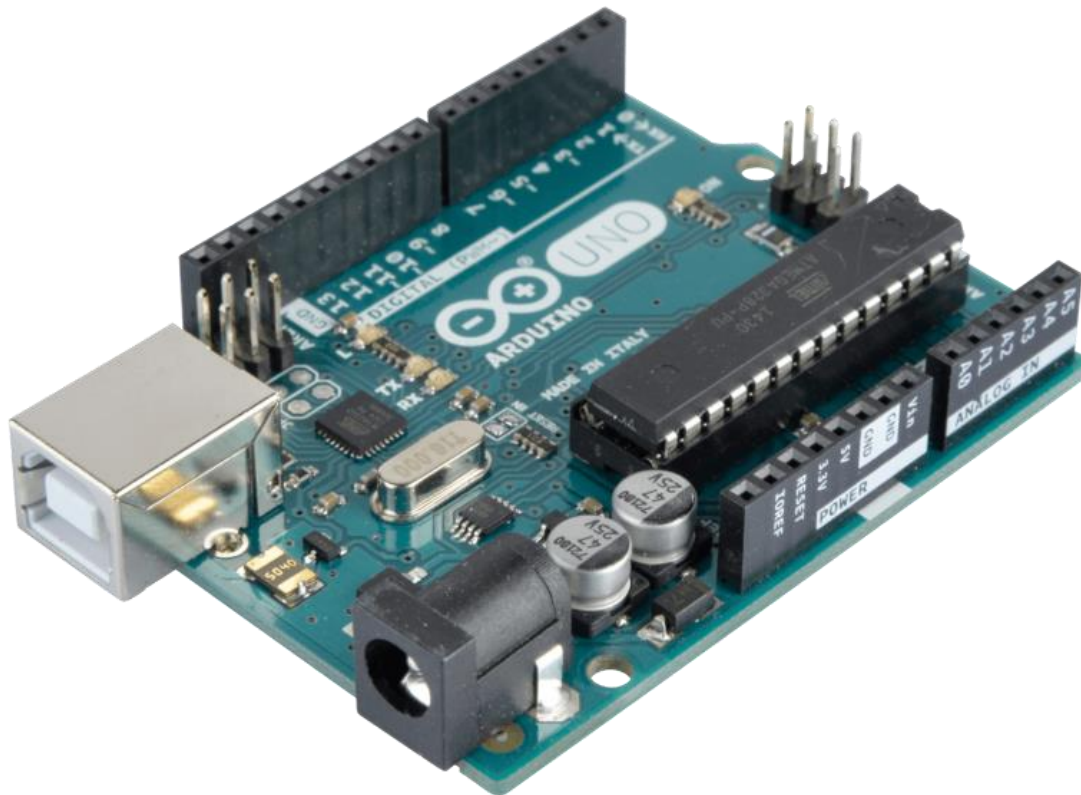


Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд плати контроллера Arduino ONU R3 на базі мікроконтроллера ATmega328

Він був вибраний через зручність в використанні та доступності. Тактова частота роботи мікроконтроллера складає 16 МГц, що також дозволяє його використовувати для зняття аудіо сигналу, частота якого під час розмови знаходиться в діапазоні до 1000 Гц. Даний пристрій дозволяє просто підключити його до комп'ютера з метою запису програмного забезпечення на мікроконтролер та зручність в знятті сигналу з датчиків, що до нього підключають. Напруга живлення складає 5В. по цій причині він не потребує

додаткового джерела живлення, яке отримує з допомогою провідника, що до того ж використовується для передачі та запису даних.

Плати-контролери Arduino здобули велику популярність в використанні, через що вони мають велику універсальність в підборі датчиків.

В якості чутливого елемента було використано трьох вісний акселерометр GY-291 3DOF на контролері DAXL345, рисунок 3.2.

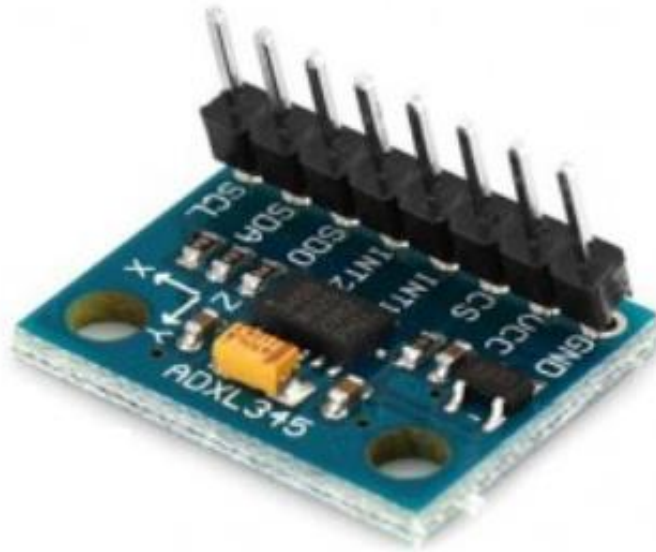


Рисунок 3.2 - трьох вісний акселерометр GY-291 3DOF на контролері DAXL345

Даний пристрій являється універсальним, так як в одному корпусі розміщено трьохвісний акселерометр, трьохвісний гіроскоп та датчик температури. Для виконня дипломної роботи було використано датчик прискорення. Його максимальна чутливість складає $\pm 16g$, а заявлена максимальна швидкість передачі даних – 3200Гц.

Напруга живлення датчика дозволяє використовувати його з платою-контролером Arduino на вході живлення 5В.

Для цифрування аналогового сигналу частота дискретизації повинна бути в два та більше разів більше чим частота сигналу. Виходячи з цього швидкості передачі даних вистачає для використання даного датчику в якості пристрою для запису звукового сигналу що містить розмову людини.

3.2 Опис пристрою для запису сигналу

Під час розробки пристрою було використано чотири виводи чутливого елементу. VCC – вивід живлення чутливого елементу. Він був підключений відповідно до виводу VCC на платі Arduino, напруга якого складає 5В. Вивід GND був приєднаний до виводу GND на платі Arduino. Виводи SCL та SDA також були відповідно підключені до виводів SCL та SDA на платі-контролері Arduino. Зовнішній вигляд зображено на рисуюнок 3.3

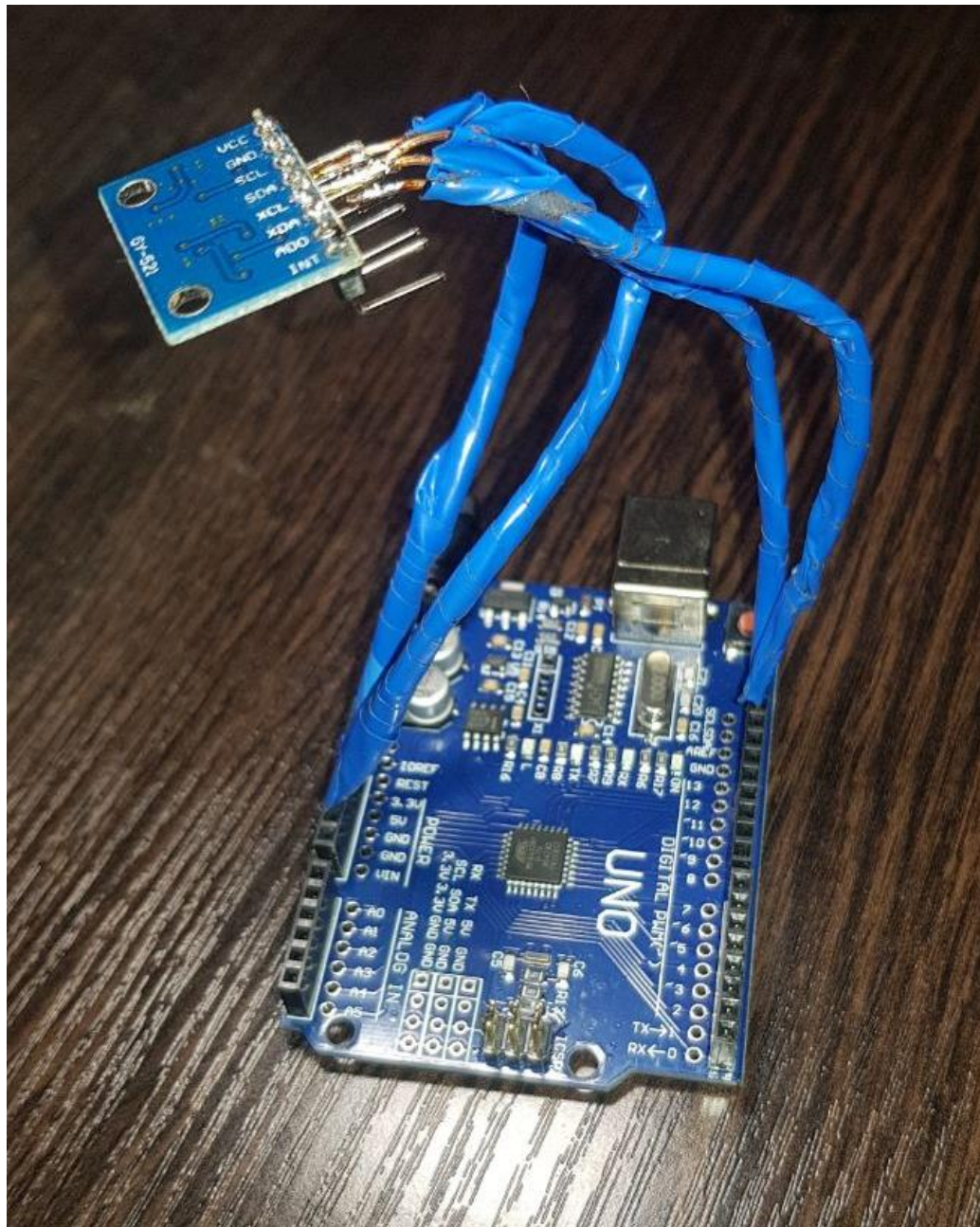


Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд пристрою

Для запису програмного забезпечення та зняття даних з чутливого елементу було використано програмне забезпечення від Arduino. Нижче приведена програма для запису та зняття даних з пристрою.

Код програми:

```
#include "Wire.h"
```

```
const int MPU_ADDR=0x68;
```

```
int16_t accel_x;
```

```
char tmp_str[7];
```

```
int num=0, Time=0;
```

```
char* convert_int16_to_str(int16_t i){
```

```
    sprintf(tmp_str,"%6d",i);
```

```
    return tmp_str;
```

```
}
```

```
void setup() {
```

```
    Serial.begin(74880);
```

```
    Wire.begin();
```

```
    Wire.beginTransmission(MPU_ADDR);
```

```
    Wire.write(0x6B);
```

```
    Wire.write(0);
```

```
    Wire.endTransmission(true);
```

```
}
```

```
unsigned long time;
```

```
void loop() {
```

```
    time=millis();
```

```

Wire.beginTransaction(MPU_ADDR);
Wire.write(0x3B);
Wire.endTransmission(false);
Wire.requestFrom(MPU_ADDR, 7*2, true);

accel_x = Wire.read()<<8 | Wire.read();
Serial.print(convert_int16_to_str(accel_x));
Serial.print(convert_int16_to_str(time));
Serial.println();
}

```

Для запису сигналу використовується лише одна вісь акселерометра. Чутливий елемент прикладається до верхньої частини горла людини. Таке розташування було вибрано з причини наявності в цій частині яскраво вираженої вібрації м'яких тканих організму під час розмови. Вмикається програма. Після припинення запису дані переносяться в файл Data.txt.

В файл записуються матриця, що складається з двох стовпців. В першому знаходяться значення прискорення чутливого елемента під час розмови. Другий стовбець зберігає значення часу, що починає рахуватися з моменту початку запису сигналу та до моменту припинення записування сигналу. Він використовується для практичного знаходження частоти запису значень сигналу.

3.3 Опис алгоритму обробки

Після запису сигналу з датчику, данні обробляються в середовищі MatLab. Код програми обробки сигналу представлений нижче.

Код програми обробки сигналу в середовищі MatLab:

```

clc
clear all
%% 1) Изображение сигнала с акселерометра
M=dlmread('Data.txt');      %% файл который считываем
Signal = M(:,1);

fd = 510;

```

```

figure(1) %Plot original signal
plot(M)

figure(2)
Xa=fftshift(fft(Signal));
stem(Signal,Xa)

figure(3)
spectrogram(Signal,Xa,1000,1000,fd)

%% 2) обрезка сигнала и центровка по оси "X"
cutmin= 1; % значение до которого сигнал
обрезается
cutmax= 5500; % значение после которого сигнал
обрезается

% cut signal
Signal=Signal(cutmin:1:cutmax);

% center signal
Mean=mean(Signal);
Signal=Signal-Mean;

figure(4) %Plot original signal
plot(Signal)

figure(5)
Xa=fftshift(fft(Signal));
stem(Signal,Xa)

figure(6)
spectrogram(Signal,Xa,1000,1000,fd)

%% record telegramm signal
[B,FS]=audioread('recording_voice.ogg');
figure(10)
plot(B)
figure(11)
Xb=fftshift(fft(B));
stem(B,Xb)
figure(12)
spectrogram(Signal,Xb,1000,1000,fd)

```

```

td=1/fd;
leg =length(Signal)-1;
time=leg/fd;
T=(0:td:time);
fs=10000;
f = 0.1*exp(-T*fs);
s = conv(Signal,f);
Signal=s(1:length(Signal));

Signal=Signal/1000;

Signal=highpass(Signal,50,fd,'ImpulseResponse','iir','Steepness',0.5);

Signal=lowpass(Signal,300,fd,'ImpulseResponse','iir','Steepness',0.9);

leg =length(Signal)-1;
time=leg/fd;
T=(0:td:time);

figure(7)
plot(T,Signal)

figure(8)
Xa=fftshift(fft(Signal));
stem(Signal,Xa)

figure(9)
spectrogram(Signal,Xa,1000,1000,fd)

%% record test signal in .WAV
filename = 'test_record.wav';
audiowrite(filename,Signal,fd);

```

Під час роботи сигналу було застосовано низькочастотні та високочастотні фільтри, для прибирання шумів, та використані коефіцієнти регулювання амплітуди знятого сигналу з сигналом, що було записано з допомогою мікрофона в програмі Telegram. Після обробки сигнал було перетворено в формат .WAV, для прослуховування його з допомогою звуковідворюючих пристроїв та програм широкого застосування.

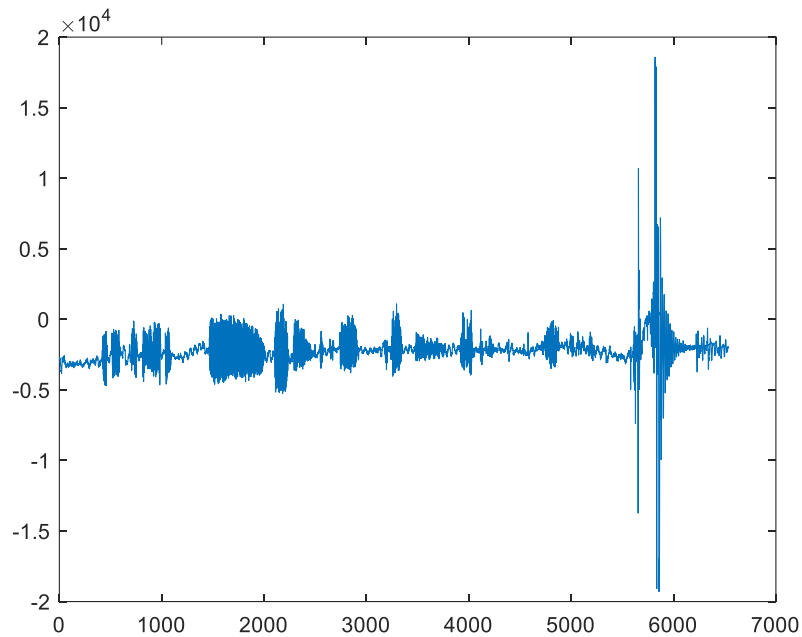
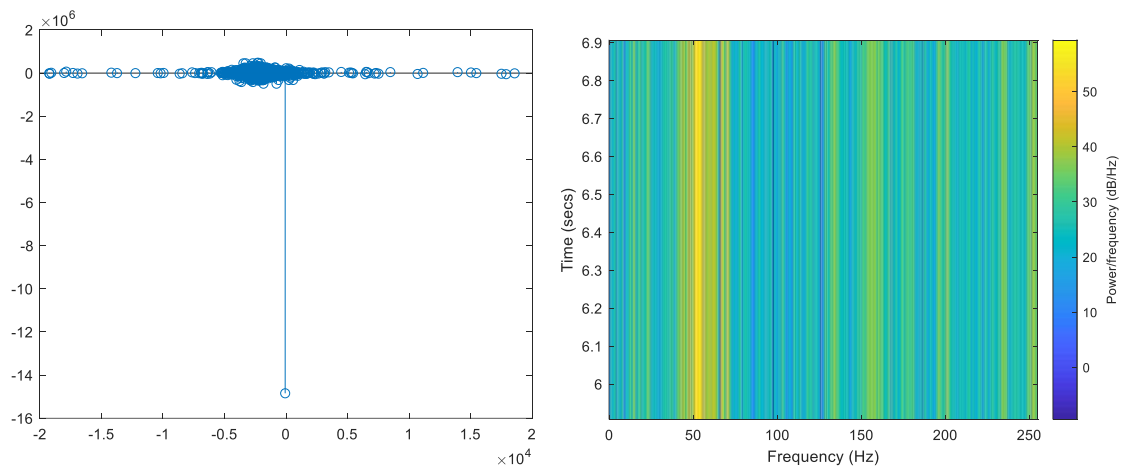


Рисунок 3.4 – Графік початкового сигналу

Відразу після запису сигналу він має вигляд, що зображено на рисунку 3.4. На даному зображенні помітно, що значення сигналу зміщено відносно осі X, так як на чутливий елемент впливає прискорення вільного падіння. Також в кінці видно значне зростання амплітуди, викликане зняттям чутливого та припиненням запису сигналу. Порівняно з прискоренням, що виникає в наслідок дії на датчик коливання тіла, дії, що викликані переміщенням самого датчика в просторі в наслідок руху розмовника мають велике амплітудне значення.



а) АЧХ вхідного сигналу

б) Спектрограма вхідного сигналу

Рисунок 3.5 – АЧХ та спектрограма вхідного сигналу

Пік викликаний переміщенням чутливого елемента в просторі ускладнює сприймання сигналу як в спектрограмі так і з допомогою АЧХ. Для покращення

сприймання сигналу було прийнято рішення на момент коректування та попередньої обробки сигналу відрізати кінець вектору, в якому знаходяться значення при знятті чутливого елементу.

Після відсікання кінцевих значень та коректування сигналу відносно вісі X, отриманий сигнал приймає наступний вигляд, що зображено на рисунок 3.6 та 3.7.

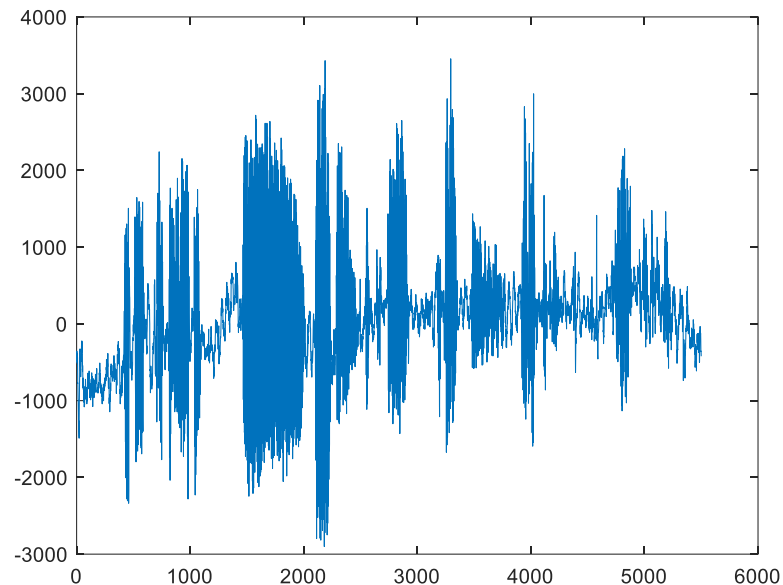
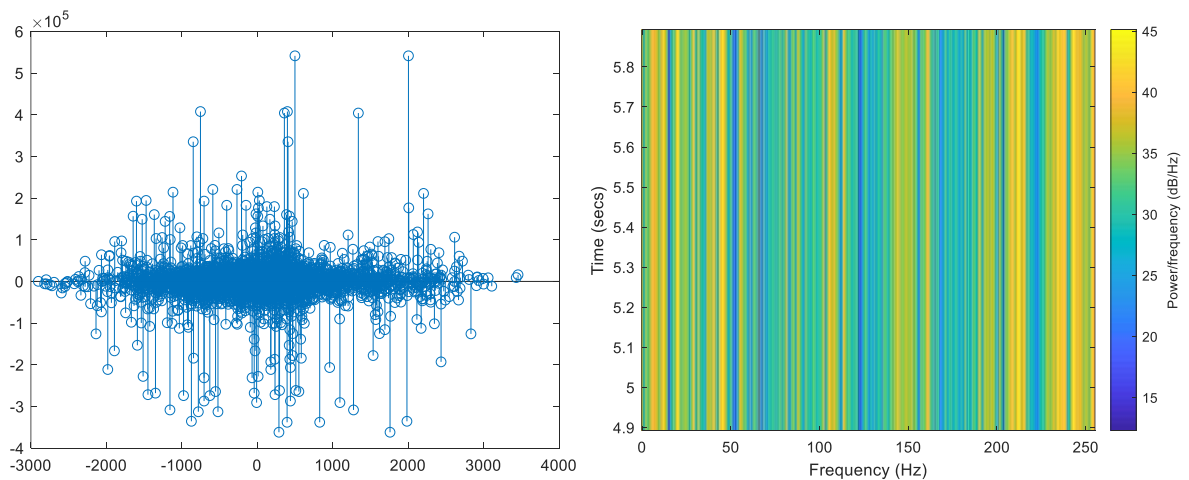


Рисунок 3.6 – Вхідний сигнал після коректування вектора



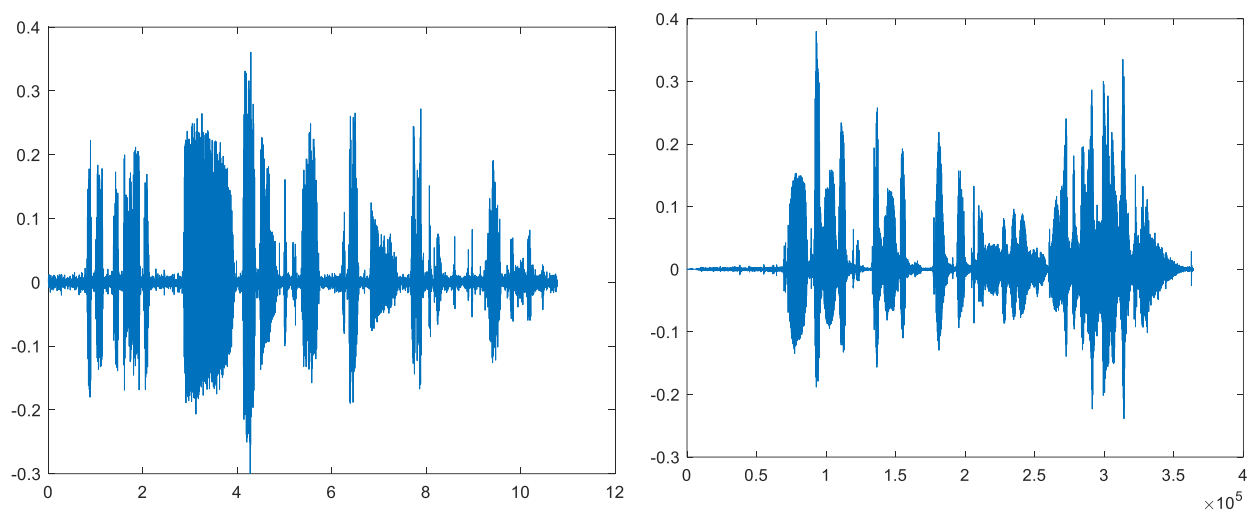
а) АЧХ вхідного сигналу

б) Спектрограма вхідного сигналу

Рисунок 3.7 – АЧХ та спектрограма вхідного сигналу після коректування вектора

На рисунку 3.7 ми можемо спостерігати, що незважаючи на те, що під час запису сигналу розмовник намагався не переміщувати датчик в просторі, сигнал має зміщення основного рівня відносно вісі X. Це зміщення викликане тим, що датчик фіксує серцебиття, коливання під час подиху та інші шуми викликані життєдіяльністю людини. На даному етапі ми спостерігаємо широкий спектр частоти сигналу що зображено на рисунку 3.7.

Після обробки сигналу на низько-частотних та високо-частотних фільтрах вигляд графіку сигналу стає подібний до сигналу, що був знятий з допомогою звичайного пристрою запису акустичного сигналу на телефоні в програмі Telegram. Результат зображено на рисунку 3.8



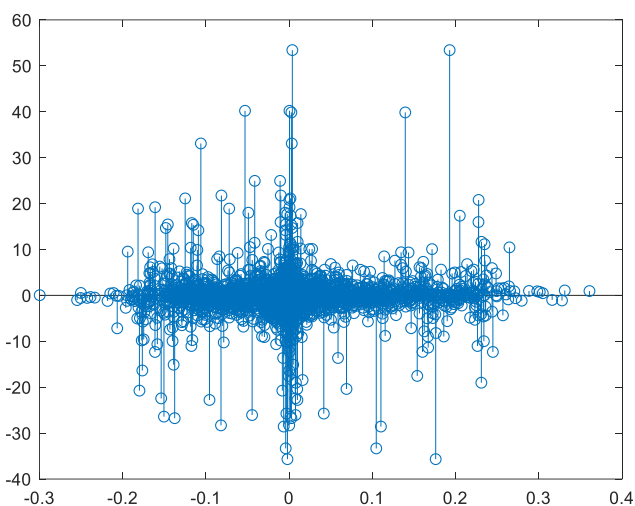
а) Запис вхідного сигналу

б) Запис аудіо з допомогою Telegram

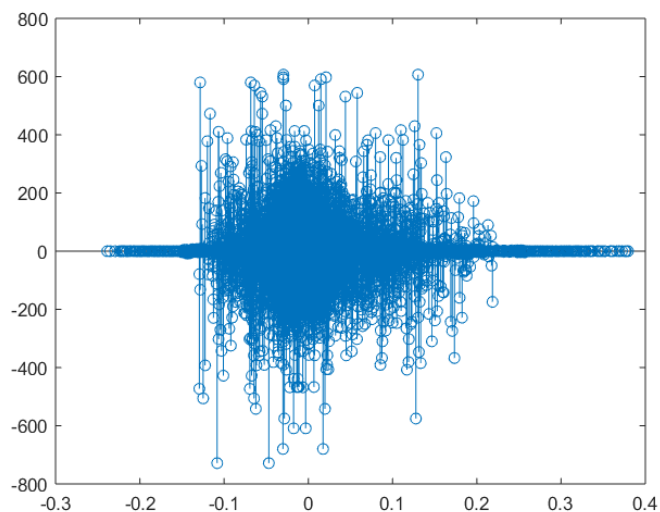
Рисунок 3.8 – Зображенні сигналу записаного в Telegram та сигналу записаного з допомогою розроблюваного пристрою

На представлених зображеннях вхідних сигнал оброблений з допомогою фільтрів та впорядкований по вісі X відповідно часу запису. На даних зображеннях помітно, що сигнал записаних в Telegram, при відсутності шуму має на порядок менший шум чим сигнал записаний з допомогою акселерометра.

Для справедливості відмічу, що аудіо інформація на сигналі з Telegram та сигналі знятому з допомогою акселерометра відрізняється.

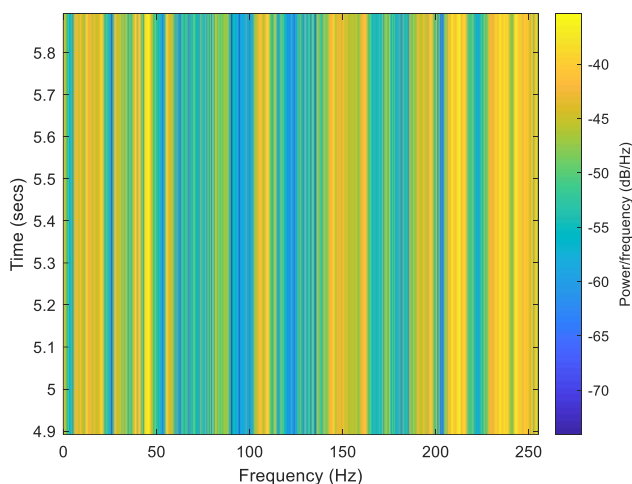


а) АЧХ вхідного сигналу

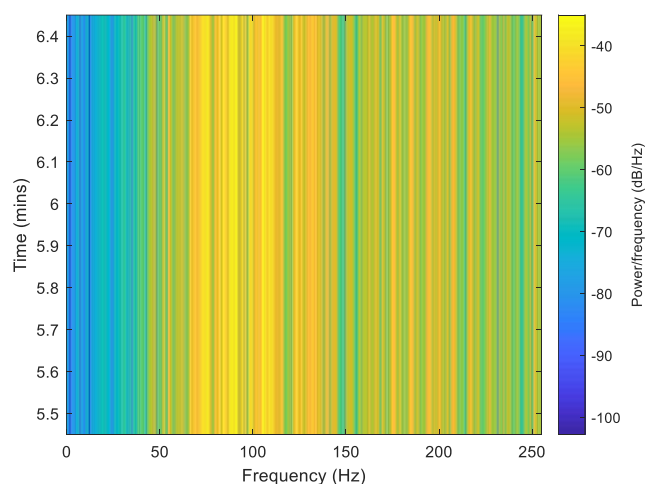


б) АЧХ сигналу з Telegram

Рисунок 3.9 – АЧХ вхідного сигналу та сигналу з Telegram



а) Спектрограма вхідного сигналу



б) Спектрограма сигналу з Telegram

Рисунок 3.10– Спектрограма вхідного сигналу та сигналу з Telegram

На рисунок 3.9 та 3.10 зображено амплітудно частотну характеристику а спектрограми вхідного сигналу та сигналу з Telegram, відповідно. На зображенні АЧХ помітно, що широта частот в сигналі записаного з датчику більша від діапазону частот в сигналі з Telegram. Також амплітуда сигналу на порядок менша від сигналу записаного традиційним методом.

Спектрограми сигналів, що зображені на малюнку 3.10 це підтверджують. Ми можемо помітити, що оброблюваний сигнал має шуми на частоті до 50 Гц, та нестабільну структура на частотах вище.

ВИСНОВОК

Під час розробки системи запису аудіо сигналу з допомогою акселерометра було підтверджено можливість такого запису аудіо сигналу. В порівнянні з сигналом записаним традиційним методом сигнал шуми при відсутності розмови, що ускладнюють розбірливість. Також для запису звукового сигналу потрібно використовувати датчик з більшою частотою передачі даних. В порівнянні сигналу записаного в Telegram частота дискретизація складає 510 Гц, що досить мало, адже інший сигнал використовує частоту, що складає 48000 Гц. Цим пояснюється якість записаного, адже аналоговий сигнал цифрується з набагато меншими втратами якості. Також такий сигнал краще обробляти фільтрами, адже частоти в ньому виражені краще.

Незважаючи на недоліки при доопрацюванні системи вона має великі переваги, так як запис сигналу відбувається за рахунок коливання тіла особи, що розмовляє. Це запобігає появленню звукового шуму в зашумленому оточенні. Даним методом запису аудіо сигналу стійкий до шуму оточую середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Система детектування голосу [Електронний ресурс]
<http://www.freepatent.ru/patents/2363994>
- 2) Кісткова провідність [Електронний ресурс]
https://ru.wikipedia.org/wiki/Костная_проводимость
- 3) Кісткові навушники, що це та як вони працюють [Електронний ресурс]
<https://ek.ua/post/2397/239-kostnye-naushniki-hto-eto-i-kak-oni-rabotayut/>
- 4) Опис та поради використання гарнітури з вібраційним мікрофоном [Електронний ресурс] <http://54sts.ru/articles/podrobnee-o-garniture-s-vibracionnym-mikrofonom/>
- 5) Ларингофон [Електронний ресурс] <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ларингофон>
- 6) Запис звуку через вібромотор телефону [Електронний ресурс]
<https://habr.com/ru/post/395109/>
- 7) Звук через кістки. Огляд гарнітури SoundAround [Електронний ресурс]
<https://habr.com/ru/company/dadget/blog/392093/>
- 8) М.А. Сапожников «Електро-акустика». Видавництво «Связь» Москва 1978 [Книга]
- 9) Вологдин Э.И. Методи та алгоритми обробки звукових сигналів. URL - <http://window.edu.ru/resource/668/77668/files/Методы%20и%20алгоритмы%20обработки%20звуковых%20сигналов.pdf>